



TUGAS AKHIR- RF 141501

## **PEMODELAN *REVERSE TIME* DAN *KIRCHHOFF MIGRATION*** **TOMOGRAFI SEISMIK**

Fuad Aulia Bahri  
NRP 3713100007

Dosen pembimbing  
Dr. Dwa Desa Warnana  
NIP. 197601232000031001

Firman Syaifuddin, S.Si, M.Si  
NIP. 198409112014041001

Departemen Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**TUGAS AKHIR - RF 141501**

**PEMODELAN *REVERSE TIME* DAN *KIRCHHOFF MIGRATION*  
TOMOGRAFI SEISMIK**

Fuad Aulia Bahri  
NRP 3713100007

Dosen pembimbing  
Dr. Dwa Desa Warnana  
NIP. 197601232000031001

Firman Syaifuddin, S.Si, M.Si  
NIP. 198409112014041001

Departemen Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**UNDERGRADUATE THESIS - RF 141501**

**REVERSE TIME AND KIRCHHOFF MIGRATION MODELLING  
SEISMIC TOMOGRAPHY**

Fuad Aulia Bahri  
NRP 3713100007

Supervisors  
Dr. Dwa Desa Warnana, M.Si  
NIP. 197601232000031001

Firman Syaifuddin, S.Si, M.Si  
NIP. 198409112014041001

Geophysical Engineering  
Faculty of Civil and Planology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# PEMODELAN REVERSE TIME DAN KIRCHHOFF MIGRATION TOMOGRAFI SEISMIK

## TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Departemen Teknik Geofisika  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 6 Juli 2017


Mengetahui:

Dosen Pembimbing 1,

Dosen Pembimbing 2,

  
Dr. Dwa Desa Warnana  
NIP. 197601232000031001



  
Firman Syaifuddin, S.Si, M.Si  
NIP. 198409112014041001

Mengetahui  
Kepala Laboratorium



Wien Lestari, ST., MT  
NIP. 198110022012122003

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “PEMODELAN *REVERSE TIME* DAN *KIRCHHOFF MIGRATION* TOMOGRAFI SEISMIK” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 6 Juli 2017

Fuad Aulia Bahri  
NRP 3713100007

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PEMODELAN *REVERSE TIME* DAN *KIRCHHOFF* *MIGRATION* TOMOGRAFI SEISMIK**

Nama	: Fuad Aulia Bahri
Program Studi	: S1 Teknik Geofisika
Departemen	: Teknik Geofisika FTSP-ITS
Dosen Pembimbing	: Dr. Dwa Desa Warnana
	: Firman Syaifuddin, S.Si, M.Si

## **ABSTRAK**

*Reverse time migration* adalah metode yang memanfaatkan penjalaran gelombang secara dua arah dalam *forward* dan *reverse*. Pendekatan ini memberikan perbaikan terhadap metode migrasi sebelumnya, terutama dalam kasus struktur dengan *dipping* yang ekstrem dan kontras kecepatan yang tinggi. Walaupun memiliki kemampuan pencitraan yang lebih akurat, *reverse time migration* membutuhkan biaya yang mahal. Salah satu metode migrasi lain yaitu metode *kirchhoff*, yang didasarkan pada penjumlahan kurva difraksi (*diffraction summation*). Metode ini adalah metode yang umumnya digunakan industri pada saat ini. Telah dilakukan percobaan untuk membandingkan metode *reverse time* dan *kirchhoff migration* dengan menggunakan model sederhana dan model geologi yang kompleks. Dilakukan migrasi secara *pre-stack* dalam domain kedalaman. Dari hasil migrasi diperoleh bahwa metode *reverse time migration* terbukti menghasilkan citra yang lebih baik dibandingkan metode *kirchhoff migration*, dengan menghasilkan model yang terlihat lebih jelas pada batas perlapisan dengan keterbatasan yang ada.

**Kata kunci:** *Reverse Time Migration, Kirchhoff Migration, Geologi Kompleks*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **REVERSE TIME AND KIRCHHOFF MIGRATION MODELLING SEISMIC TOMOGRAPHY**

Student Name : Fuad Aulia Bahri  
Student ID Number : S1 Teknik Geofisika  
Department : Geophysical Engineering Dept.  
Supervisors : Dr. Dwa Desa Warnana  
: Firman Syaifuddin, S.Si, M.Si

## **ABSTRACT**

Reverse time migration is a method that utilizes wave propagation in two directions in forward and reverse. This approach improves previous migration methods, especially in the case of extreme dipping structures and high velocity contrast. Despite having more accurate imaging capabilities, reverse time migration is expensive method. One other migration method is kirchhoff method, that based on diffraction summation. This method is commonly used by industry at this time. Experiments have been conducted to compare reverse time and kirchhoff migration using simple models and complex geological settings. Migration performed in pre-stack and depth Migration. From the migration results that have been obtained reverse time migration method proved to produce a better image than kirchhoff migration, by producing a clearly data model on the boundary with a few limitations.

**Key words: Reverse Time Migration, Kirchhoff Migration, Geological Complex**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, syukur kepada Allah yang maha Pengasih dan Penyayang yang telah memberikan rahmat dan hidayahNya sehingga penulisan tugas akhir ini telah selesai. Tak lupa shalawat dan salam dihaturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa petunjuk bagi seluruh umat manusia. Penulisan tugas akhir ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarja teknik pada program studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis menyadari tanpa dukungan, bantuan, dan doa dari orang-orang di sekitar penulis, tugas akhir ini tidak akan dapat diselesaikan. Ungkapan terima kasih diucapkan kepada seluruh pihak yang telah berpartisipasi membantu penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini, khususnya kepada:

1. Orang tua dan keluarga penulis yang telah memberikan dukungan material, moral, dan spiritual kepada penulis;
2. Bapak Dr. Dwa Desa Warnana dan Bapak Firman Syaifuddin, S.Si., M.T, selaku dosen pembimbing yang dengan baik dan sabar telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing penulis dalam penyusunan tugas akhir ini;
3. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Geofisika ITS yang telah banyak memberikan ilmu dan membantu secara administrasi selama penulis melakukan studi di Departemen Teknik Geofisika ITS;
4. Sahabat, rekan-rekan Teknik Geofisika ITS 2013 yang telah membantu saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini; dan
5. Semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu per satu, terima kasih banyak atas doa dan dukungannya

Penulis mengharapkan kritik dan saran terhadap tugas akhir ini untuk perbaikan dikemudian hari. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi khalayak yang membacanya serta dapat digunakan sebagai bahan evaluasi dalam mengembangkan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

JUDUL COVER .....	iii
TITLE COVER.....	v
LEMBAR PENGESAHAN .....	vii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	ix
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI .....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Perumusan Masalah .....	2
1.3    Batasan Masalah.....	2
1.4    Tujuan .....	2
1.5    Manfaat .....	2
1.6    Sistematika Penulisan.....	2
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	5
2.1    Tomografi Seismik.....	5
2.1.1 Definisi Tomografi Seismik.....	5
2.1.2 Prinsip Fermat dan Tomografi Waktu Tempuh .....	6
2.2    Metode Penelusuran Jejak Sinar (Ray Tracing Methodology).....	6
2.2.1 Metode Penembakan Sinar (Shooting Method) .....	7
2.2.2 Metode Persamaan Gelombang Penuh (Full Wave Equation) .....	8
2.3    Prinsip Huygen.....	9
2.4    Acoustic Finite Difference (Forward Modelling).....	10
2.5    Kirchhoff Migration .....	12
2.6    Reverse Time Migration.....	14
BAB 3 METODOLOGI .....	17

3.1	Diagram Alir Penelitian .....	17
3.2	Metodologi Penelitian .....	18
3.2.1	Data Model Kecepatan .....	18
3.2.2	Parameterisasi Model .....	21
3.2.3	Geometri Akuisisi Pengukuran .....	22
3.2.4	Acoustic Finite Difference (Forward Modelling) .....	22
3.2.5	Travel Time Eikonal .....	24
3.2.6	Kirchhoff Migration .....	25
3.2.7	Reverse Time Migration .....	26
3.2.8	Analisis Hasil .....	28
BAB 4	PEMBAHASAN .....	31
4.1	Forward Modelling Model .....	31
4.2	Travel Time Eikonal .....	37
4.3	Analisis Hasil Migrasi Kirchhoff dan Reverse Time Migration .....	39
4.3.1	Analisis waveform .....	48
4.3.2	Analisis Komputasi .....	49
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN .....	51
5.1	Kesimpulan .....	51
5.2	Saran .....	51
DAFTAR PUSTAKA	.....	53
LAMPIRAN	.....	56
BIODATA PENULIS	.....	64

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ray tracing menurut Hukum Snellius (Sheriff, 1995) .....	7
Gambar 2.2 Komputasi penjalaran gelombang / Huygens (Saito, 1990).....	10
Gambar 2.3 Skema perhitungan Finite Differences pada nilai grid .....	12
Gambar 2.4 Forward modelling seismik pada single trace (Min Zhou, 2001) .	13
Gambar 2.5 Full-aperture Kirchhoff migration dari satu trace. Waktu sample yang diukur berdasarkan <i>rsr</i> dan <i>rrg</i> berbentuk elips (Min Zhou, 2001) .....	13
Gambar 2.6 Penentuan reflektor berdasarkan superposisi hyperbolas. (Stanford Exploration Project, 2001) .....	14
Gambar 2.7 Perbedaan waveform reverse time migration. (a) gelombang up, (b) & (e) reverse time jika menggunakan $p$ (tekanan) atau $v$ (kecepatan partikel), (c) & (f) reverse time jika menggunakan $p$ dan $v$ , (d) gelombang down. Gelombang ini digunakan untuk melakukan reverse propagation (Min Zhou, 2002) .....	15
Gambar 2.8 Hasil reverse time migration memperlihatkan dipping reflektor yang lebih jelas Courtesy of Paul Farmer (GX Technology), 2006.....	16
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	17
Gambar 3.2 Data Model Kecepatan 3 Lapis .....	18
Gambar 3.3 Data Model sinklin.....	18
Gambar 3.4 Data Model Patahan SEG/EAGE .....	19
Gambar 3.5 Data Model Marmousi .....	19
Gambar 3.6 Data Salt Dome BP Velocity Analysis Benchmark .....	20
Gambar 3.7 Fokus Pengujian Pada Data Saltdome.....	20
Gambar 3.8 Parameterisasi model 3 lapis .....	21
Gambar 3.9 Stacking Chart dan Perhitungan Fold Coverage .....	22
Gambar 3.10 Gelombang ricker frekuensi 20 hz .....	23

Gambar 3.11 Forward Modelling pada shot ke 50 .....	24
Gambar 3.12 Data Travel Time Eikonal shot 58.....	25
Gambar 3.13 Hasil Kirchhoff Migration pre-stack dan stack, model kecepatan, dan shot record .....	26
Gambar 3.14 Reverse wave propagation, migrasi Reverse Time Migration Shot 50.....	27
Gambar 3.15 Hasil Reverse Time Migration pre-stack dan stack, Model Kecepatan, dan Shot Record .....	27
Gambar 3.16 Shot Record dalam bentuk .sgy .....	28
Gambar 3.17 Shot record setelah ditambahkan data header .....	28
Gambar 3.18 Display pada Software Vista .....	29
Gambar 4.1 Penjelasan Reflektor .....	31
Gambar 4.2 Fenomena Bow Tie Pada Shot Record .....	31
Gambar 4.3 Forward Modelling Data Patahan .....	32
Gambar 4.4 Forward Modelling Data Marmousi .....	32
Gambar 4.5 Forward Modelling Data Salt Dome.....	33
Gambar 4.6 Gambar shot record jika dx dan dz bernilai 10 m (kiri), gambar shot record jika dx dan dz bernilai 20 (kanan) menggunakan frekuensi = 30 .....	33
Gambar 4.7 Gelombang ricker frekuensi = 20 Hz.....	34
Gambar 4.8 Gelombang Ricker dengan frekuensi $f = 50$ Hz .....	35
Gambar 4.9 Shot record frekuensi = 20 (kiri), frekuensi = 50 (kanan) .....	35
Gambar 4.10 Shot 130 Data Marmousi sebelum dilakukan AGC.....	36
Gambar 4.11 Shot 130 Data Marmousi setelah dilakukan AGC .....	36

Gambar 4.12 Amplitudo Spectrum Shot 130 Data Marmousi .....	37
Gambar 4.13 Data Travel Time patahan pada shot 50 di titik 500 .....	37
Gambar 4.14 Travel time Eikonal data Patahan .....	38
Gambar 4.15 Travel time Eikonal Data Marmousi .....	38
Gambar 4.16 Travel time Eikonal Data Salt Dome .....	38
Gambar 4.17 Kirchhoff Migration Data Sinklin .....	39
Gambar 4.18 Metode Reverse Time Migration .....	40
Gambar 4.19 Metode Kirchhoff Migration.....	41
Gambar 4.20 Hasil kirchhoff Migration data patahan .....	42
Gambar 4.21 Hasil Reverse Time Migration Data Patahan .....	42
Gambar 4.22 Hasil Kirchhoff Migration Data Marmousi.....	43
Gambar 4.23 Hasil Reverse Time Migration Data Marmousi .....	43
Gambar 4.24 Hasil kirchhoff Migration Data Salt Dome .....	44
Gambar 4.25 Hasil Reverse Time Migration Data Salt Dome.....	44
Gambar 4.26 Perbandingan Hasil Migrasi Data Patahan.....	45
Gambar 4.27 Hasil tampilan RTM (kiri) dan Kirchhoff Migration (kanan) Data Patahan .....	45
Gambar 4.28 Perbandingan Hasil Migrasi Data Marmousi .....	46
Gambar 4.29 Hasil tampilan RTM (kiri) dan Kirchhoff Migration (kanan) Data Marmousi.....	46
Gambar 4.30 Perbandingan hasil migrasi data salt dome .....	47
Gambar 4.31 Hasil tampilan RTM (kiri) Kirchhoff Migration (kanan) data salt dome .....	47

Gambar 4.32 Waveforms Turning Waves .....	48
Gambar 4.33 Waveforms Prism Waves .....	48
Gambar 4.34 Grafik Komputasi Kirchhoff Migration VS RTM .....	50

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1 Geometri Akuisisi Pengukuran .....	22
Tabel 4.1 Tabel Waktu Komputasi .....	49
Tabel 4.2 Tabel Penyimpanan Data .....	50





# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Tomografi adalah suatu teknik khusus yang dapat digunakan untuk mendapatkan gambaran bagian dalam dari suatu obyek berupa benda padat tanpa memotong atau mengirisnya (Munadi, 1992). Khusus pada tomografi seismik, menggunakan prinsip-prinsip dan hukum gelombang. Tomografi seismik digunakan untuk mengetahui bagaimana proses penjalaran gelombang hingga kemudian di rekonstruksi menjadi model. Seiring berjalannya waktu, ilmu tomografi seismik berkembang dengan metode *ray tracing: shooting method*, *bending method*, dan *full wave equation*. Proses rekonstruksi data juga berkembang dengan menggunakan: teknik transformasi, metode ekspansi deret meliputi *singular value decomposition*, *gauss newton* (Bishop et al., 1985), *conjugate gradient* (Scales, 1987), dan metode row action meliputi: *back projection technique*, *algebraic reconstrusive technique* dan *simultaneous iterative reconstruction technique* (Trampert & Leveque, 1990). Namun dalam eksplorasi seismik, posisi sumber dan penerima gelombang terletak di permukaan, sehingga tidak dapat melakukan proyeksi dari segala arah. Perlu adanya proses pengolahan khusus untuk merekonstruksi data menjadi model. Salah satu proses yang penting dalam pengolahan seismik yaitu migrasi.

Migrasi bertujuan untuk mengembalikan posisi reflektor miring ke posisi semula. Posisi reflektor yang berubah dapat dijelaskan dari fenomena *wave propagation*. Ketika gelombang melalui bidang reflektor maka akan ada gelombang yang direfleksikan. Migrasi dapat merubah posisi dari reflektor tersebut ke posisi sebenarnya (Gray et al., 2001). Migrasi dalam seismik terbagi 2 yaitu dalam *pre-stack* dan *post-stack* (Bednar, 2005). *Pre-stack* dilakukan migrasi pada data gather sebelum *stacking*, sedangkan *post stack* dilakukan migrasi setelah dilakukan *stacking*. Sedangkan berdasarkan jenis domain data, migrasi terbagi 2 yakni dalam domain waktu (*time migration*) dan kedalaman (*depth migration*). Jenis migrasi dalam domain waktu yaitu *finite difference migration* (Claerbout and Doherty, 1972), *stolt migration* (Stolt, 1978), dan *gazdag / phase shift migration* (Gazdag, 1978). Sedangkan dalam domain kedalaman adalah *Wavefield Extrapolation migration* (Berkhout, 1981), *kirchhoff migration* (Schneider, 1978), *adaptive beam Migration / Gaussian beam migration* (Hill, 1990), dan *reverse time migration*. Salah satu metode migrasi yang paling efektif yaitu *reverse time migration* (Zhang & Sun, 2009).

*Reverse time migration* merekonstruksi penjalaran sumber gelombang secara maju dalam waktu dan penjalaran penerima gelombang secara mundur dalam waktu (Feng and Schuster, 2017). Dasar tersebut diaplikasikan untuk mendapatkan informasi reflektor dari rekonstruksi perambatan gelombang. *Reverse time migration* termasuk dalam klasifikasi *pre-stack depth migration*.

Keunggulan dari *reverse time migration* dibandingkan metode migrasi lainnya yaitu melakukan extrapolasi *reverse time propagation* dengan tidak menggunakan *evanescent* energi dan tidak ada batas *dip* (Baysal et al., 1983; McMechan, 1983). *Evanescent* adalah gelombang semu yang dihasilkan akibat sudut kritis. Walaupun konsepnya sederhana, namun *reverse time migration* tidak banyak digunakan dikarenakan komputasi yang lama dan biaya yang mahal. Seiring berkembangnya zaman dalam perangkat keras, perangkat lunak, maupun algoritma, Reverse time migration mulai sering digunakan pada industri dikarenakan juga kebutuhan dalam pemodelan geologi yang kompleks contoh: salt-dome (Boechat et al. 2007; Jones et al. 2003). Metode migrasi dalam domain kedalaman lainnya yaitu *kirchhoff migration*. Metode ini paling banyak digunakan pada industri saat ini. *Kirchhoff migration* menggunakan persamaan *kirchhoff* dari persamaan gelombang dengan melakukan superposisi gelombang berdasarkan data travel time (Sun et al., 2000). Metode ini memiliki kelemahan yakni tidak bisa menyelesaikan semua permasalahan bentuk gelombang (*waveform*). Kelemahan ini dapat diselesaikan oleh *reverse time migration*. Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis ingin melakukan percobaan dan melakukan analisis dari metode *reverse time migration* serta melakukan perbandingan dengan *kirchhoff migration*.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu bagaimana hasil pemodelan *reverse time migration* dan *kirchhoff migration* pada data geologi kompleks, kemudian membandingkan hasil antara *reverse time migration* dan *kirchhoff migration*.

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah penelitian ini adalah tidak membahas masalah besaran amplitudo dan *Q factor* pada hasil migrasi model geologi kompleks.

## **1.4 Tujuan**

Tujuan penelitian ini yaitu mendapatkan model / citra yang baik dari hasil perbandingan migrasi dengan menggunakan metode *reverse time migration* dan *kirchhoff migration* pada data geologi yang kompleks.

## **1.5 Manfaat**

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai pembelajaran untuk memahami *reverse time migration* dan dapat menjadi referensi atau informasi tambahan kepada khayalak dalam riset geofisika khususnya dalam bidang seismik.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Penulisan tugas akhir ini dilakukan secara sistematis pada setiap bab seperti berikut:

- Bab 1 Pendahuluan  
Pada bagian ini penulis membahas secara ringkas mengenai latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, serta sistematika penulisan dari tugas akhir ini.
- Bab 2 Tinjauan Pustaka  
Bagian ini menguraikan teori dari perambatan gelombang, *forward modelling*, *reverse time migration* dan *kirchhoff migration* yang mendasari proses penelitian pada tugas akhir ini
- Bab 3 Metodologi  
Bagian ini menjelaskan tentang alur kerja penelitian serta proses tahap-tahap yang dilakukan dalam penelitian
- Bab 4 Pembahasan  
Bagian ini menjelaskan hasil analisis dari metode *reverse time migration* dan *kirchhoff migration*
- Bab 5 Kesimpulan dan Saran  
Bagian ini penulis menarik beberapa kesimpulan dari analisis hasil *reverse time migration* dan *kirchhoff migration* dan kemudian memberikan beberapa saran sebagai pertimbangan pada studi lebih lanjut

***Halaman ini sengaja dikosongkan***

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Tomografi Seismik

##### 2.1.1 Definisi Tomografi Seismik

Tomografi merupakan suatu teknik khusus yang dapat digunakan untuk mendapatkan gambaran bagian dalam dari suatu obyek berupa benda padat tanpa memotong atau mengirisnya. Caranya dengan melakukan pengukuran-pengukuran di luar obyek tersebut dari berbagai arah (yang disebut membuat proyeksi-proyeksi), kemudian merekonstruksinya (Munadi, 1992). Tomografi seismik memerlukan cara tersendiri karena ada keterbatasan dalam melakukan proyeksi. Lapisan-lapisan batuan yang berada di bawah permukaan bumi tidak dapat diproyeksikan ke berbagai arah. Selain itu penggunaan gelombang seismik sebagai sinar yang dipakai untuk membuat proyeksi juga memiliki keterbatasan penanganannya.

Dalam Seismik dikenal tiga macam tomografi, yakni tomografi yang berdasarkan pada gelombang transmisi (*transmission tomography*), tomografi yang berdasarkan gelombang refleksi (*reflection tomography*), dan tomografi yang berdasarkan gelombang difraksi (*diffraction tomography*) (Munadi, 1992).

Tomografi refleksi memanfaatkan gelombang refleksi yang berasal dari gelombang seismik. Dalam penentuan *raypath* suatu gelombang refleksi, akan digunakan reflektor-reflektor yang ditentukan sebagai reflektor acuan (model) bagi gelombang refleksi yang menjalar dari shot menuju receiver menggunakan metode *forward tomography* dengan memilih *raypath* dengan *travel time* minimum. *Travel time* ini menjadi dasar dari perhitungan pemodelan kecepatan melalui proses inversi tomografi.

Dalam analisis tomografi seismik refleksi, dilakukan pula proses rekonstruksi, yaitu suatu proses membangun obyek berdasarkan hasil proyeksinya dari berbagai arah. Proses rekonstruksi ini merupakan proses inversi. Artinya, bertolak dari waktu rambat gelombang yang teramati kemudian dicari penyebabnya. Penyebab ini dapat berupa distribusi kecepatan ataupun rekahan secara vertical maupun lateral. Satu persamaan mewakili satu sinar seismik yang merambat dari sumber ke penerima melintasi medium yang sudah dibagi-bagi dalam bentuk sel-sel yang kecil. Masing-masing sel tadi mempunyai nilai kecepatan awal tertentu. Optimalisasi penyelesaian persamaan linier simultan ini akan menyebabkan proses iterasinya mengkonvergen secara cepat dan memberikan nilai nilai kecepatan di setiap sel (Menke, 1984).

Beberapa perbedaan yang perlu diketengahkan antara analisis seismik konvensional dan tomografi seismik refleksi, antara lain adalah bahwa seismik konvensional bertumpu kepada amplitude gelombang sedangkan tomografi seismik refleksi bertumpu pada waktu rambat gelombang. Pada seismik konvensional lapisan-lapisan batuan di model sebagai blok-blok yang horizontal dengan sifat-sifat elastik tertentu, sedang pada tomografi seismik refleksi model

perlapisan-perlapisan itu berupa sel-sel yang jauh lebih kecil daripada blok yang masing-masing juga mempunyai sifat-sifat elastik tertentu. Selain itu, tomografi seismik refleksi sangat memperhitungkan/memanfaatkan pengaruh sudut datang gelombang (arah proyeksi), sedangkan pada seismik konvensional pengaruh tersebut hanya dikoreksi (Yilmaz, 2001).

Pada sub bab selanjutnya akan dibahas beberapa prinsip dan dasar teori yang digunakan dalam pemodelan kecepatan dengan metode tomografi refleksi waktu tempuh (*travel time tomography reflection*).

### 2.1.2 Prinsip Fermat dan Tomografi Waktu Tempuh

Waktu rambat gelombang seismik dalam tomografi adalah integral slowness yang dilalui oleh sinar yang menghubungkan antara sumber dengan receiver. Untuk memperjelas hal tersebut, sebagai ilustrasi anggap  $i$  adalah sebuah berkas sinar yang menghubungkan antara sumber dengan receiver dalam sebuah model sintetik dengan slowness  $s$ . Didefinisikan bahwa  $t_i$  adalah waktu yang diperlukan sinar  $j$  untuk merambat dari sumber ke receiver dengan  $s$  fungsi kontinu, maka didapatkan:

$$t_i > \int s(x) dl^i \quad (2-1)$$

Prinsip Fermat mengatakan bahwa “Gelombang akan mencari jalan tercepat dari satu titik ke titik lain” Maka penerapan dalam tomografi, bila sebuah sinar yang sesuai dengan prinsip fermat dimisalkan adalah  $p$ , sehingga mempunyai  $t_i$  yang paling minimum maka persamaan ( 2-1 ) berubah menjadi

$$t_i > \int_{pi} S(x) dl^p \quad (2-2)$$

Bila diberikan sebuah model diskrit dengan membagi suatu medium menjadi sebanyak  $j$  sel. Persamaan ( 2-2 ) dapat ditulis kembali sebagai:

$$t_i > \sum_{j>1}^N l_{ij} S_j \quad (2-3)$$

## 2.2 Metode Penelusuran Jejak Sinar (*Ray Tracing Methodology*)

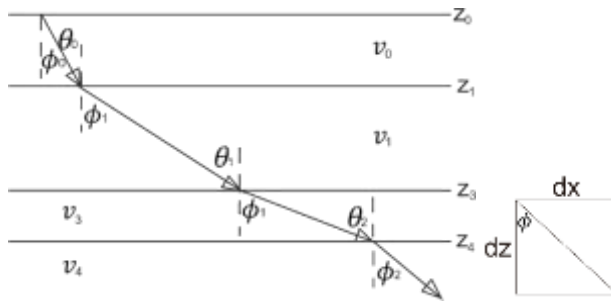
Dalam fisika, penelusuran jejak sinar (*ray tracing*) adalah metode untuk menghitung jalan gelombang atau partikel melalui sistem dengan berbagai kecepatan propagasi, karakteristik penyerapan, dan permukaan. Dalam keadaan ini, muka gelombang dapat menekuk, mengubah arah, atau mencerminkan permukaan sehingga menyulitkan analisis, *Ray tracing* menyelesaikan masalah ini dengan menelusuri sinar yang melalui media dengan jumlah diskrit. Analisis yang lebih rinci dapat dilakukan dengan menggunakan komputer untuk menyebarkan banyak sinar.

*Ray tracing* merupakan proses yang sangat penting di dalam aktivitas seismik eksplorasi seperti untuk keperluan desain survei, seismik modelling, 4 D seismik, seismik tomography, dan lain-lain. Seismik modelling bertujuan untuk memodelkan gambaran permukaan bumi dengan menembakkan gelombang

seismik ke dalam suatu medium. Dalam proses ini, *ray tracing* digunakan untuk memberikan gambaran gelombang seismik yang merambat melalui suatu media hingga gelombang diterima oleh *receiver*. Geofisika memanfaatkan hasil pemodelan dari permukaan bumi ini dalam merancang suatu survei seismik sebelum melakukan proses akuisisi. Ada tiga metode ray tracing yang utama dalam tomografi (Berryman, 1991), yaitu Metode penembakan sinar (shooting methods), metode *pseudo-bending*, dan metode *full wave equation*.

### 2.2.1 Metode Penembakan Sinar (Shooting Method)

Untuk model bumi berlapis *ray tracing* dapat dilakukan dengan mengikuti Hukum Snellius. Dalam metode penembakan sinar, *raypath* di tentukan dengan mencoba memasukkan sudut estimasi dalam persamaan *raypath* sampai berkas akhir sinar paling mendekati titik penerima. Gambar 2.1 menjelaskan proses metode penembakan sinar dalam memodelkan *raypath* dari suatu gelombang seismik.



Gambar 2.1 *Ray tracing* menurut Hukum Snellius (Sheriff, 1995)

Hubungan antara sudut datang gelombang, sudut transmisi dan kecepatan gelombang untuk masing-masing sinar akan memiliki parameter sinar ( $p$ ) tertentu yang sama untuk semua lapisan.

Berdasarkan Gambar 2.1 diketahui bahwa:

$$\tan(\phi(z)) = \frac{dx}{dz} \quad (2-4)$$

Sehingga

$$\begin{aligned} dx &= \tan(\phi(z)) dz \\ &= \frac{\sin(\phi(z))}{\cos(\phi(z))} dz \\ &= \frac{pV(z)dz}{\sqrt{1 - \sin^2(\phi(z))}} \quad , \text{ untuk nilai } p = \sin \frac{\phi_j}{v_j} \end{aligned} \quad (2-5)$$

Maka diperoleh jarak lateral sinar (offset)  $dx$  pada masing-masing lapisan ialah

$$dx = \frac{\rho V(z) dz}{\sqrt{1 - p^2 V^2(z)}} \quad (2-6)$$

Diketahui bahwa:

$$\cos(\phi(z)) = \frac{dz}{dt V(z)} \quad (2-7)$$

Sehingga

$$dt = \frac{dz}{V(z) \cdot \cos(\phi(z))} = \frac{dz}{V(z) \sqrt{1 - \sin^2(\phi(z))}} \quad (2-8)$$

Maka diperoleh waktu tempuh  $dt$  pada masing masing lapisan ialah

$$dt = \frac{dz}{v(z) \sqrt{1 - p^2 v^2(z)}} \quad (2-9)$$

Dimana  $v(z)$  adalah kecepatan pada kedalaman  $z$ . Dengan menjumlahkan seluruh  $dx$  dan  $dt$ , maka diperoleh *offset* dan waktu tempuh untuk masing-masing sinar.

Metode penembakan sinar sangat akurat, tetapi juga memakan waktu yang cukup lama. Untuk mendapatkan jejak sinar, harus memakai iterasi sudut sampai posisi akhir sinar sangat dekat dengan penerima. Mungkin akan memakan waktu yang cukup lama hanya untuk mendapatkan sudut yang tepat, dan kemungkinan gagal dalam mendekatkan posisi akhir ke penerima juga sangat besar.

### 2.2.2 Metode Persamaan Gelombang Penuh (*Full Wave Equation*)

Masalah seperti multi jejak dan zona kecepatan rendah, dapat diatasi dengan metode gelombang penuh. Pada metode ini waktu rambat dihitung dari sumber ke semua kisi-kisi, berbeda dengan metode *shooting* dan *bending* yang hanya menghitung waktu datang gelombang dari sumber menuju ke penerima. Beberapa metode telah diajukan berdasarkan prinsip ini, diantaranya adalah berdasar prinsip Huygen (Saito, 1990) dan juga dengan persamaan eikonal (Qin et al., 1992). Diketahui persamaan isotropis eikonal:

$$\nabla T(x) \cdot \nabla T(x) = \frac{1}{v^2(x)} \equiv W(x) \quad (2-10)$$

Dimana  $x$  adalah titik pada jarak tertentu,  $T(x)$  adalah waktu tempuh dan  $v(x)$  adalah kecepatan. Untuk model 2D,  $x$  adalah vektor yang terdiri atas kedalaman dan posisi *inline* (*offset*), untuk model 3D,  $x$  juga terdapat posisi *crossline*. Dalam bentuk ringkas  $W(x)$  adalah *slowness* kuadrat. Persamaan (2-10) dapat diturunkan dengan memasukkan teori sinar pada persamaan gelombang dan diatur berdasarkan orde tertentu (Chapman, 2004). Berikut turunan rumus jika  $T(x_s) = 0$  dimana  $x_s$  adalah lokasi sumber.

Titik sumber dari waktu tempuh pada setiap titik  $T(x)$  bergantung pada lokasi sumber  $x_s$ . Secara eksplisit menunjukkan ketergantungan pada persamaan eikonal. Didefinisikan koordinat relatif  $q$  sebagai:



$$q = x - x_s \quad (2-11)$$

Dan gunakan  $\hat{T}(q; x_s)$  sebagai penanda waktu tempuh dalam koordinat relatif. Substitusi ke persamaan ( 2-11 ) didapatkan

$$\nabla_q \hat{T} \cdot \nabla_q \hat{T} = W(q + x_s) \quad (2-12)$$

Bentuk diferensiasi  $\nabla_q$  sebagai operator gradient pada setiap nilai  $q$  terhadap nilai  $x_s$ . Sehingga pada 3D jika  $q = (q_1, q_2, q_3)$  dan  $x$  selanjutnya disebut  $e_i$  dengan  $j = \{1,2,3\}$  pada vektor kedalaman, inline dan crossline, sehingga

$$\nabla_q \equiv \frac{\partial}{\partial q_1} e_1 + \frac{\partial}{\partial q_2} e_2 + \frac{\partial}{\partial q_3} e_3 \quad (2-13)$$

Untuk mendapatkan nilai waktu tempuh berdasarkan sumber  $\partial T / \partial x_s$ , dilakukan penurunan berdasarkan arah  $\partial / \partial x_s$  dengan  $\hat{T}(q; x_s)$  dilakukan berdasarkan aturan rantai.

$$\frac{\partial T}{\partial x_s} \equiv \frac{\partial \hat{T}}{\partial x_s} = \frac{\partial \hat{T}}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_s} + \frac{\partial \hat{T}}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial x_s} = \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial T}{\partial q} \quad (2-14)$$

Persamaan ( 2-14 ) menghasilkan vektor waktu tempuh sumber berdasarkan kedalaman, inline, dan crossline. Namun pada penelitian ini menggunakan 2D, sehingga kita berasumsi bahwa kedalaman sumber yang konstan dan hanya pada inline. Selanjutnya penyelesaian waktu tempuh pada setiap grid dilakukan *finite-difference*, sehingga didapatkan

$$\nabla_q \hat{T} \cdot \nabla_q \frac{\partial \hat{T}}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial W}{\partial x} \quad (2-15)$$

Persamaan ( 2-15 ) merupakan bentuk linear dari persamaan eikonal (Aldrige, 1994). Jika persamaan ( 2-14 ) dilakukan diferensiasi dan persamaan ( 2-16 ) dilakukan kembali *finite difference* maka akan menghasilkan menghasilkan orde yang lebih tinggi.

$$\nabla_q \frac{\hat{T}}{\partial x} \cdot \nabla_q \frac{\hat{T}}{\partial x} + \nabla_q \hat{T} \cdot \nabla_q \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (2-16)$$

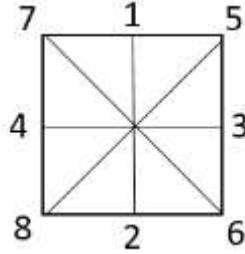
Kemudian persamaan eikonal untuk menghitung waktu tempuh disederhanakan oleh Alkhalifah and S. Fomel (2010) pada nilai  $\partial W / \partial x$  dan  $\partial \hat{T} / \partial q$ :

$$\nabla_q \hat{T} \cdot \nabla_q \frac{\partial \hat{T}}{\partial (q + x_s)} = \frac{1}{2} \frac{\partial W}{\partial x} \quad (2-17)$$

### 2.3 Prinsip Huygen

Cristian Huygen pada tahun 1670 menjelaskan tentang bagaimana gelombang merambat. Ide tentang perambatan gelombang ini kemudian terkenal dengan prinsip huygen: “setiap titik pada gelombang dapat dianggap sebagai sumber gelombang sekunder yang menyebar ke segala arah”.

Dalam kasus gelombang bidang, muka gelombang yang merambat akan menjadi sumber baru. Komputasi dari metode huygen diperlihatkan oleh skema pada untuk kasus 2D dengan menggunakan 8 jejak sinar pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Komputasi penjalaran gelombang / Huygens (Saito, 1990)

Titik tengah selanjutnya disebut sebagai titik sumber, dimana titik dengan index 1,2,3, ... 8 adalah titik-titik terdekatnya. Algoritma perhitungan dalam metode ini adalah sebagai berikut:

Menghitung waktu tempuh dari sumber ke titik-titik terdekat  $T(m,n)$ , kemudian informasi waktu tempuh dari titik-titik yang terhitung disimpan.  $T(m,n)$  adalah informasi waktu tempuh di sumber, sedangkan  $T'(m',n')$  merupakan informasi waktu tempuh di titik terdekat sumber. Dimana  $L$  adalah jarak dan  $V$  adalah kecepatan.

$$T'_{m',n'} = T_{m,n} + \sum_i \frac{L_i}{V_i} \quad (2-18)$$

Kemudian titik-titik yang mempunyai waktu tempuh paling kecil, dengan prinsip Huygen dijadikan sebagai sumber baru. Dari sumber baru ini, titik-titik kisi-kisi yang belum dihitung waktu tempuhnya, dihitung kembali dengan persamaan ( 2-18 ). Algoritma yang dikemukakan Sasa menjadi dasar dalam perhitungan waktu rambat dengan konsep gelombang penuh

#### 2.4 Acoustic Finite Difference (Forward Modelling)

*Acoustic finite difference forward modelling* bertujuan untuk mendapat data shot record serta propagasi gelombang. Sebelum melakukan proses ini dilakukan perhitungan *sample interval*, *record length*, dan *traces samples*.

$$dt = 0,9 \times \min\left(\min\left(\frac{dz}{v}\right)\right) \quad (2-19)$$

$$t = \sqrt{\left(\left((dx * nx)^2 + (dz * nx)^2\right) * \frac{2}{\frac{vmin}{dt}}\right) + 1} \quad (2-20)$$

$dt$  adalah nilai *sample interval* yang didapatkan dari interval kedalaman model  $dz$  dan nilai kecepatan  $dv$  dari suatu model. Sedangkan  $t$  adalah *record length*

yang didapatkan dari total panjang dx dan kedalaman dz dari grid. Sedangkan nx adalah banyak data dari nilai dx. Perhitungan persamaan ( 2-19 ) dan ( 2-20 ) didasarkan dari nilai yang optimum dan menyesuaikan dari nilai grid kecepatan. Kemudian dilakukan perhitungan koefisien gelombang untuk selanjutnya dilakukan *finite differences*.

$$a = \left( v * \frac{dt}{dx} \right)^2 \quad ( 2-21 )$$

$$b = 2(-4 * a) \quad ( 2-22 )$$

(Lamoureux, 2006)

Dilakukan perhitungan *finite differences* pada setiap grid untuk menghitung propagasi gelombang. Misal jika *initial wavefield* terdapat pada A1 maka selanjutnya akan menghitung perambatan gelombang pada titik titik terdekat terlebih dahulu. Kemudian setelah itu menghitung titik titik terdekat selanjutnya dan seterusnya hingga dibatasi oleh nilai record length yang dijelaskan pada Gambar 2.3. Berikut perhitungan algoritma finite differences pada platform matlab.

```
fdm = zeros(nx,nt,3)
% finite differencing on interior
for it = 2:nt
    fdm(iz,ix,3) = b(iz,ix).*fdm(iz,ix,2) - fdm(iz,ix,1)
    + a(iz,ix).*(fdm(iz,ix+1,2) + fdm(iz,ix-1,2) +
    fdm(iz+1,ix,2) + fdm(iz-1,ix,2));
end
```

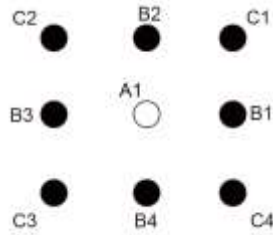
dilakukan update data

```
% update fdm for next time iteration
    fdm(:, :, 1) = fdm(:, :, 2);
    fdm(:, :, 2) = fdm(:, :, 3);
```

Output berupa hasil snapshot propagasi gelombang dan shot record

```
data(:,it) = fdm(1, :, 2);
snapshot(:, :, it) = fdm(:, :, 2);
```

Hasil forward modelling berupa data dalam domain waktu dengan grid (nx,nt). Data akan disimpan pada setiap nilai dt. Hasil *finite differences* akan menghasilkan propagasi gelombang sebanyak nilai nt atau total sampels, sedangkan nilai shot record adalah nilai propagasi gelombang tersebut yang dicatat hanya di posisi permukaan (*geophone*).



Gambar 2.3 Skema perhitungan Finite Differences pada nilai grid

## 2.5 Kirchhoff Migration

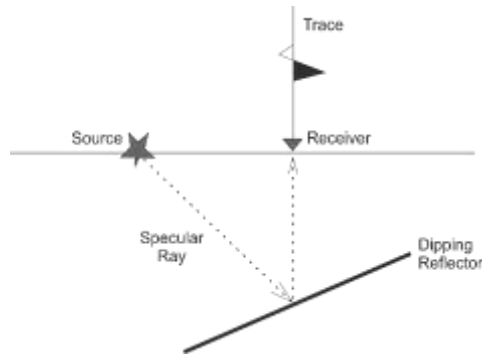
Migrasi Kirchhoff atau sering disebut dengan migrasi penjumlahan kirchhoff adalah metode migrasi yang didasarkan pada penjumlahan kurva difraksi (*diffraction summation*). Metode ini merupakan suatu pendekatan secara statistic di mana posisi suatu titik di bawah permukaan dapat saja berasal dari berbagai kemungkinan lokasi dengan tingkat probabilitas yang sama. Secara praktis migrasi kirchhoff dilakukan dengan cara menjumlahkan amplitudo dari suatu titik reflektor sepanjang suatu tempat kedudukan yang merupakan kemungkinan lokasi yang sesungguhnya (Dirk, Radu, and Vanelle, 2002).

Suatu bidang reflektor (horizon reflektor untuk penampang 2 dimensi) representasinya pada penampang offset nol adalah superposisi dari hiperbola-hiperbola difraksi dari titik-titik pada bidang tersebut yang bertindak sebagai Huygens *secondar source*. Migrasi Kirchhoff membawa titik-titik yang berada pada posisi seharusnya (Yilmaz, 2001).

Migrasi Kirchhoff dapat dilakukan dalam suatu migrasi kawasan waktu menggunakan kecepatan RMS dan straight ray atau dalam migrasi kawasan kedalaman menggunakan kecepatan interval dan ray tracing

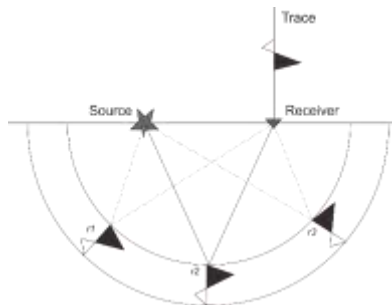
Keuntungan utama dari migrasi Kirchhoff ini adalah penampilan kemiringan curam yang baik. Sedangkan salah satu kerugiannya adalah kenampakan yang buruk jika data seismik mempunyai sinyal to noise yang rendah. Berikut penjelasan rumus matematis dari kirchhoff migration

Terdapat source dan geophone yang terletak pada permukaan dan terdapat satu reflektor miring. Akan terjadi refleksi primer yang direkam oleh seismic trace. Waktu datang sama dengan waktu travel time dari source menuju titik refleksi p dan dari p menuju geophone. Garis putus-putus menandakan perkiraan ray. Dalam proses forward modelling, reflektor pada titik p dikonvolusikan dengan source wavelet membentuk waveform. Secara matematika model dideskripsikan dengan  $d = Lm$  dimana d adalah hasil forward seismic data, L adalah operator linear forward modelling, dan m adalah reflektivitas model.

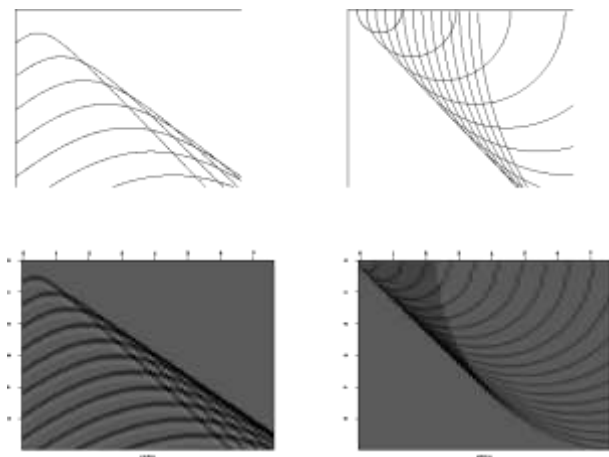


Gambar 2.4 Forward modelling seismik pada single trace (Min Zhou, 2001)

Untuk melakukan imaging pada migrasi secara matematika adalah  $m = L^T d$ . Untuk melakukan migrasi dilakukan *velocity analysis* untuk mendapatkan persebaran kecepatan, namun pada penelitian kali ini menggunakan data travel time yang diselesaikan oleh persamaan eikonal (Qin et al., 1992). Dibutuhkan data  $r_{sr}$  yaitu waktu tempuh dari sumber ke titik refleksi  $r$ . Data  $r_{rg}$  waktu tempuh untuk propagasi dari titik  $r$  menuju geophone.  $R$  adalah lokasi dimana  $r_{sr} + r_{rg}$  sama dengan observasi waktu tempuh pada event yang dijelaskan pada Gambar 2.5. Jika ada titik reflektor pada  $(x_0, z_0)$ . Reflektor awal pada nilai  $t=0$ , data pada  $z=0$  merupakan fungsi dari  $x$  dan waktu tempuh  $t$  untuk mendapatkan sinyal hyperbolic  $t^2 = \frac{(x-x_0)^2 + z_0^2}{v^2}$ . Jika terdapat reflektor maka akan terjadi superposisi dari hyperbolic (difraksi gelombang) seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.5 Full-aperture Kirchhoff migration dari satu trace. Waktu sample yang diukur berdasarkan  $r_{sr}$  dan  $r_{rg}$  berbentuk elips (Min Zhou, 2001)



Gambar 2.6 Penentuan reflektor berdasarkan superposisi hyperbolas. (Stanford Exploration Project, 2001)

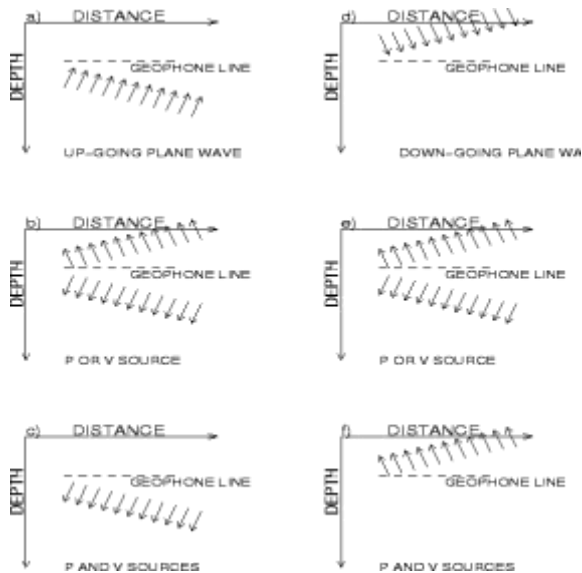
## 2.6 Reverse Time Migration

Reverse time migration (RTM) adalah salah satu metoda migrasi mutakhir yang mampu menangani proses migrasi pada struktur yang kompleks (iluminasi gelombang yang terbatas, dip yang tinggi >85 derajat, gelombang prisma) yang sebelumnya tidak bisa ditangani oleh metode migrasi konvensional. Reverse time migration merupakan proses migrasi terbaru dengan memanfaatkan *two-way wave* migration untuk hasil imaging yang lebih akurat di daerah yang memiliki struktur yang rumit dan velocity yang kompleks, seperti area sedimen dengan intrusi kubah garam. RTM telah terbukti untuk menghasilkan hasil model yang bagus dan dapat memperbaiki batas struktur lapisan pada setiap nilai kecepatan (Feng, Schuster, and Abdullah, 2016).

Algoritma reverse time migration menggunakan staggered-grid finite difference dengan orde kedua hingga ke empat berdasarkan ruang. Migrasi dilakukan disetiap gather. Migrasi pada reverse time migration di modelkan

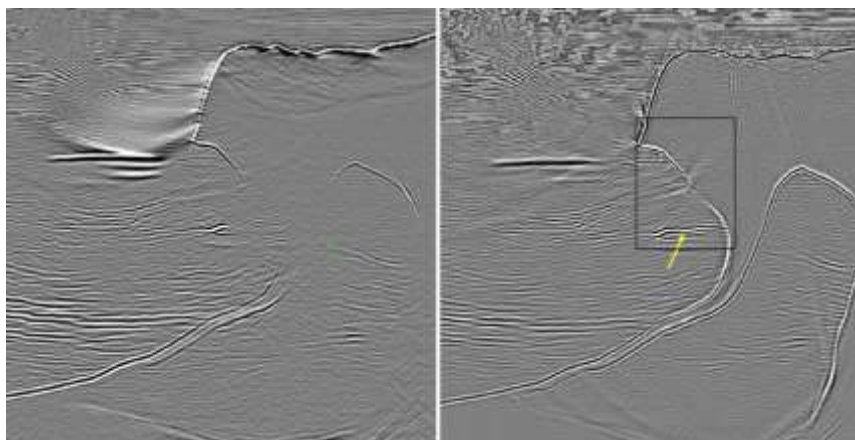
$$m_1(x) = \int F(x,t)R(x,t)dt \quad (2-23)$$

Dimana  $m(x)$  adalah model migrasi pada titik  $x$  dan  $F(x,t)$  dan  $R(x,t)$  adalah forward dan reverse time wavefield pada titik  $x$ . Berikut penjelasan pembagian klasifikasi gelombang naik dan turun dari reverse time migration pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Perbedaan waveform reverse time migration. (a) gelombang up, (b) & (e) reverse time jika menggunakan p (tekanan) atau v (kecepatan partikel), (c) & (f) reverse time jika menggunakan p dan v, (d) gelombang down. Gelombang ini digunakan untuk melakukan reverse propagation (Min Zhou, 2002)

Kelebihan RTM tersebut karena metoda ini melakukan solusi persamaan gelombang dalam dua arah (*forward dan reverse*): Kross Korelasi dari hasil perambatan forward dan reverse akan menghasilkan bidang reflektor. Penjumlahan dari sample-sample yang dihasilkan sehingga diperoleh cube seismik. Contoh di bawah ini menunjukkan kelebihan RTM (kanan) dibandingkan dengan WEM (kiri) untuk mempertajam perangkat stratigrafi akibat intrusi garam (Gambar 2.8 Hasil reverse time migration memperlihatkan dipping reflektor yang lebih jelas *Courtesy of Paul Farmer (GX Technology), 2006.*).



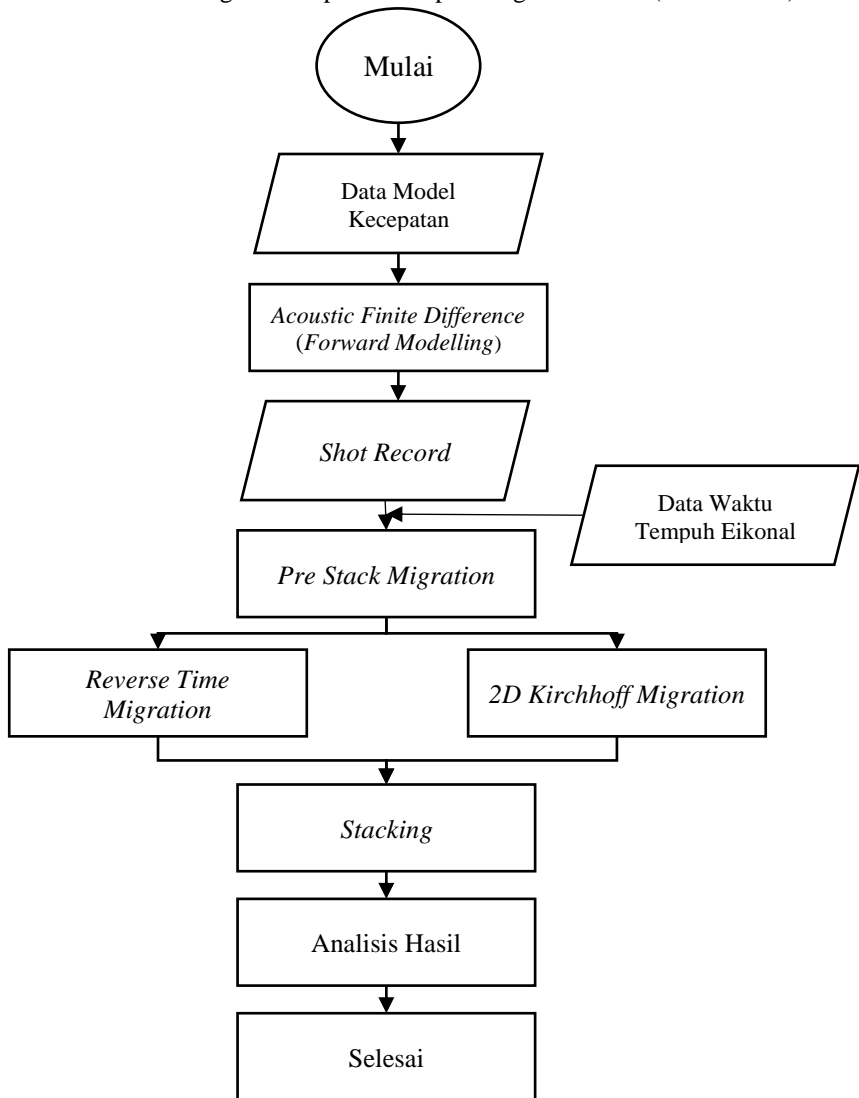
Gambar 2.8 Hasil reverse time migration memperlihatkan dipping reflektor yang yang lebih jelas *Courtesy of Paul Farmer (GX Technology), 2006.*



## BAB 3 METODOLOGI

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir penelitian pada tugas akhir ini (Gambar 3.1)



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

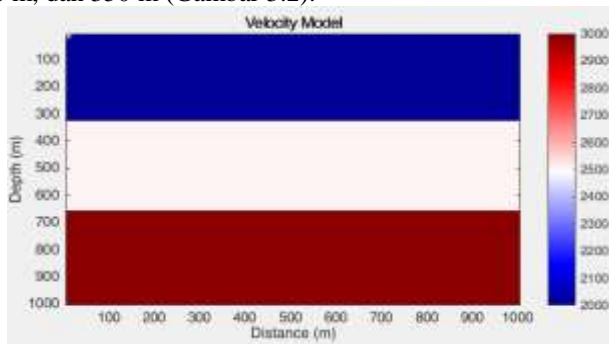
## 3.2 Metodologi Penelitian

Penjelasan pengolahan data pada Gambar 3.1 adalah sebagai berikut:

### 3.2.1 Data Model Kecepatan

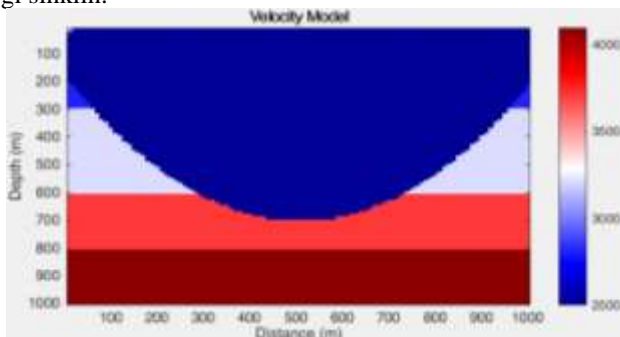
Data model kecepatan merupakan data kecepatan dalam bentuk matriks ( $M \times N$ ) M adalah baris dan N adalah kolom. Matriks tersebut kemudian dilakukan gridding untuk melihat bentuk model secara 2D. Model kecepatan ini berdasarkan fenomena keadaan model geologi bawah permukaan. Model yang digunakan yakni model sederhana berupa model 3 lapis, sinklin, dan patahan serta model geologi kompleks yang berpatokan pada kondisi geologi sebenarnya yakni model marmousi dan model salt dome.

Berikut model 3 lapis, model ini terdiri dari 3 lapisan dengan nilai kecepatan dari atas ke bawah 2000 m/s, 2500 m/s dan 3000 m/s dengan ketebalan 300 m, 350 m, dan 350 m (Gambar 3.2).



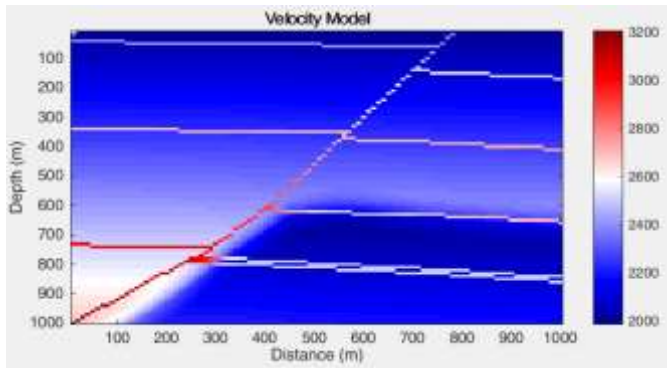
Gambar 3.2 Data Model Kecepatan 3 Lapis

Berikut model sinklin (Gambar 3.3). Model ini berupa model lipatan dan terdapat beberapa lapisan lurus dengan variasi nilai kecepatan 2500 – 4100 m/s. Model ini digunakan untuk menganalisis hasil difraksi yang dihasilkan dari efek geologi sinklin.



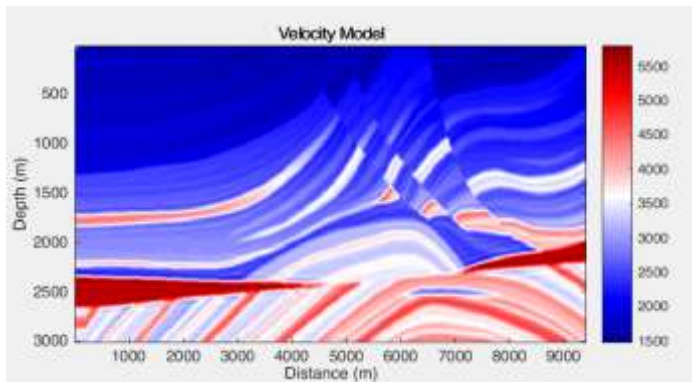
Gambar 3.3 Data Model sinklin

Model ketiga adalah model patahan (Gambar 3.4). Model ini didapatkan dari potongan data SEG/EAGE salt model. Model ini terdapat adanya contrast velocity dan adanya patahan naik.



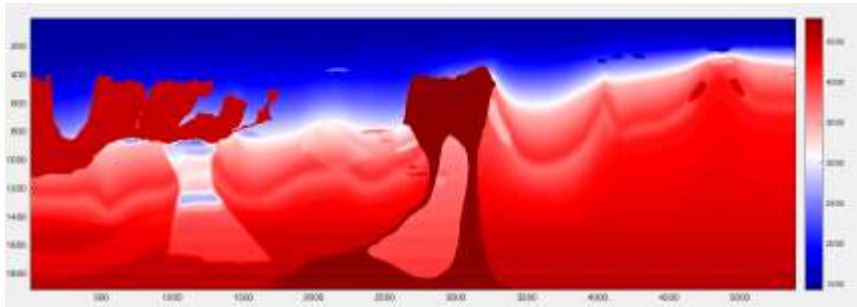
Gambar 3.4 Data Model Patahan SEG/EAGE

Model ke 4 adalah model. Marmousi, model marmousi dibuat pada tahun 1988 oleh Institut Français du Pétrole (IFP) yang mana merupakan organisasi riset terbuka di Negara Perancis. Geometri dari model ini berdasarkan dari profil bawah permukaan North Quenguela pada cekungan Cuanza. Geometri dan kecepatan dibuat untuk menciptakan data seismic yang kompleks dan butuh processing yang lebih lanjut untuk mendapatkan gambaran citra yang baik. Data marmousi dulunya digunakan pada workshop 52<sup>nd</sup> EAGE pada tahun 1990. Semenjak tahun 1990 data marmousi telah menjadi semacam standar dari data sets seismik dalam melakukan pengujian dan riset seismik (Gambar 3.5).

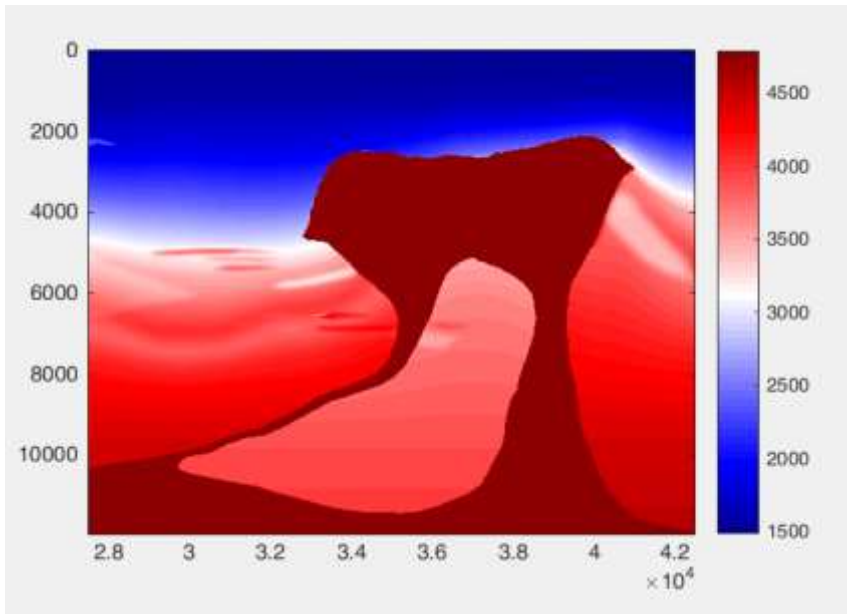


Gambar 3.5 Data Model Marmousi

Model ke 5 adalah *salt dome*. Data ini adalah data yang dibuat oleh BP yang disebut sebagai *2004 BP Velocity-Analysis Benchmark* yang dulunya ditampilkan pada workshop “*Estimation of Accurate Velocity Macro Models in Complex, Structures*” 2004 EAGE meeting di Paris, Perancis. Kemudian data ini didistribusikan oleh SEG. Data ini sering digunakan sebagai patokan dalam melakukan pengujian dan riset pada studi kasus model salt dome (Gambar 3.6) dan (Gambar 3.7).



Gambar 3.6 Data Salt Dome BP Velocity Analysis Benchmark  
Pada penelitian ini fokus dilakukan pengujian pada daerah salt dome saja.



Gambar 3.7 Fokus Pengujian Pada Data Saltdome

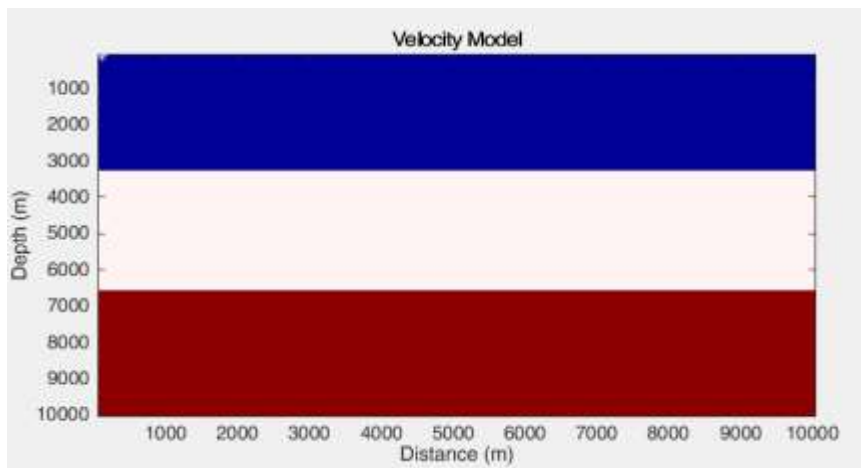
### 3.2.2 Parameterisasi Model

Sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut, terlebih dahulu dilakukan parameterisasi model. Parameter model yang dapat diatur berupa: parameter model  $n_z$  yaitu jumlah data baris,  $n_x$  yaitu jumlah data kolom,  $dx$  adalah jarak antar titik horizontal,  $dz$  adalah jarak antar titik dari vertikal,  $x$  adalah nilai horizontal setelah dimasukan nilai  $dx$ , sedangkan  $z$  adalah nilai vertikal setelah dimasukkan nilai  $dz$ . Parameter model ini diperlukan untuk melakukan analisa jarak dan luasan model, besar kecilnya grid ( $M \times N$ ) akan menentukan hasil forward modelling selanjutnya.

Berikut script parameterisasi model 3 lapis data kecepatan (100x100)

```
load velocityModel
[nz,nx] = size(velocityModel);
dx = 100;
dz = 100;
x = (1:nx)*dx;
z = (1:nz)*dz;
subplot(2,2,1)
imagesc(x,z,velocityModel)
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth (m)');
title('Velocity Model');
colormap(seismic)
```

Berikut hasil plot (Gambar 3.8)



Gambar 3.8 Parameterisasi model 3 lapis

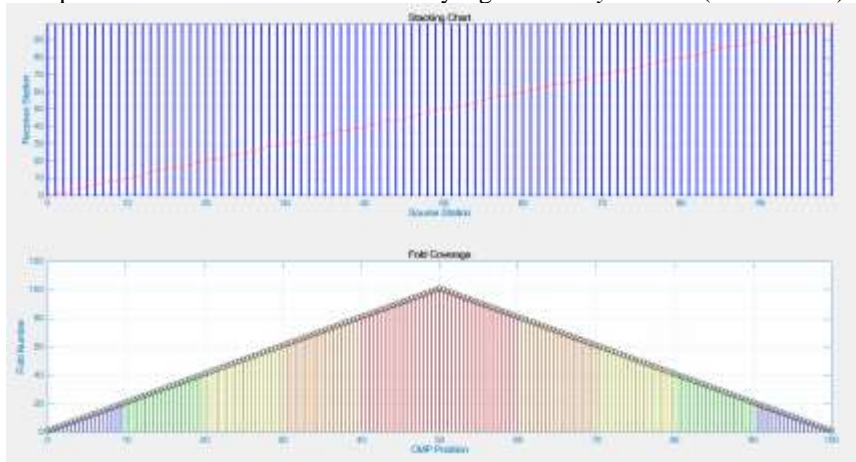
### 3.2.3 Geometri Akuisisi Pengukuran

Geometri pengukuran berupa fixed datum dengan posisi receiver tetap. Berikut penjelasan geometri Gambar 3.2 yang disajikan dalam Tabel 3.1

Tabel 3.1 Geometri Akuisisi Pengukuran

Parameter	Variabel	Nilai
Panjang Model	$n_x * dx$	1000 m
Kedalaman Model	$n_x * dx$	1000 m
Jumlah geophone	Jumlah $n_x$	100
Jumlah shot	Jumlah $n_x$	100
Interval geophone	$dx$	100 m
Interval shot	$dx$	100 m

Berikut *stacking chart* akuisisi pengukuran dan perhitungan *fold coverage*. Fold coverage adalah jumlah ray tracing yang melewati satu CDP. Jumlah fold mempresentasikan kualitas data seismik yang dilalui *ray seismik* (Gambar 3.9).



Gambar 3.9 Stacking Chart dan Perhitungan Fold Coverage

### 3.2.4 Acoustic Finite Difference (Forward Modelling)

Dihitung nilai  $dt$  atau sample interval menggunakan rumus ( 2-19 ), dihitung nilai  $nt$  atau traces samples menggunakan rumus ( 2-20 ). Kemudian dibentuk nilai  $t$  yang merupakan susunan dari nilai  $dt$  dari sample pertama sampai ke nilai  $nt$ . Selanjutnya ditentukan nilai frekuensi.

Berikut script untuk pengaturan pengukuran

```
dt = 0.9*min(min(dz./velocityModel/sqrt(2)));
vmin = min(velocityModel(:));
nt = round(sqrt((dx*nx)^2 + (dz*nx)^2)*2/vmin/dt + 1);
t = (0:nt-1).*dt;
```

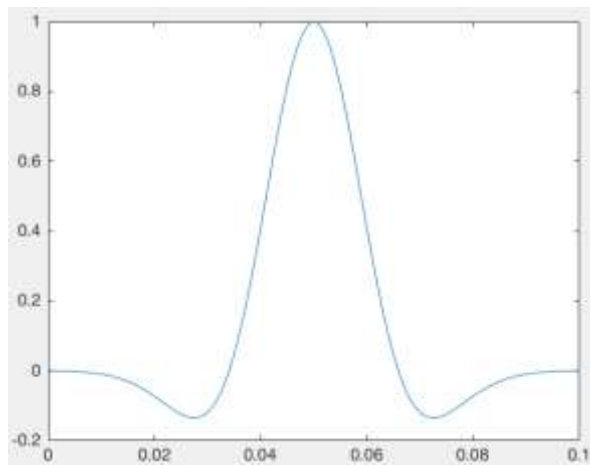
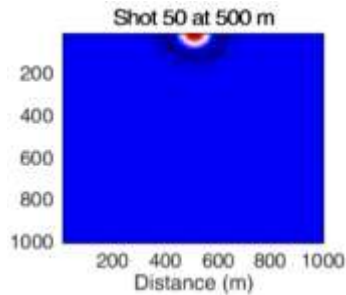
```
f = 20;
```

Sebelum dilakukan forward modelling terlebih dahulu dibentuk parameter gelombang yang selanjutnya dilakukan konvolusi dengan data waktu untuk menghasilkan shot record. Pada penelitian ini menggunakan gelombang ricker dengan bantuan fungsi `ricker.m`. Skrip ini menghasilkan data `rw` untuk membentuk initial wavefield (Gambar 3.10).

```
[rw,t] = ricker(f,n,dt,t0,t1)
```

Berikut script ricker 2 dimensi pada model Gambar 3.2 dengan posisi shot ke 50

```
rw = ricker(f,nz+40,dt,dt*ixs,0);
```

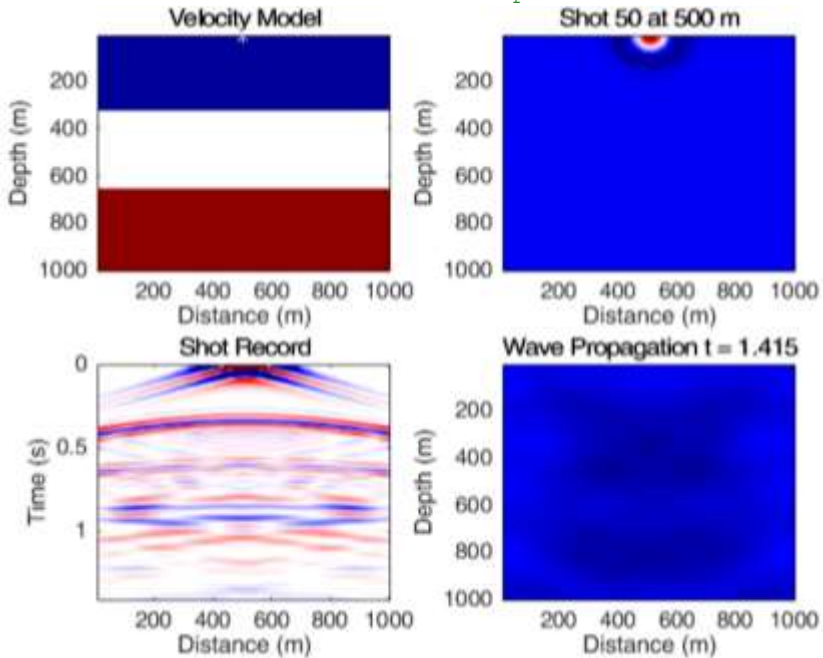


Gambar 3.10 Gelombang ricker frekuensi 20 hz

Kemudian dilakukan perhitungan forward modelling menggunakan fungsi `fm2d.m` secara looping dari shot 1 sampai shot ke `n`. Terlebih dahulu dihitung nilai koefisien gelombang berdasarkan rumus ( 2-21 ) dan ( 2-22 ) dan

dilakukan finite differences berdasarkan rumus yang telah dibahas pada BAB sebelumnya. Hasil forward modelling menghasilkan shot record (Gambar 3.11). Berikut skrip fungsi fm2d

```
function [data snapshot] =
fm2d(v,model,nz,dz,nx,dx,nt,dt)
%
% model(nz,nx)      model vektor
% v(nz,nx)          model kecepatan
% nx                banyak data horizontal
% nz                banyak data vertikal
% nt                samples time
% dx                jarak antar titik horizontal
% dz                jarak antar titik vertikal
% dt                interval samples
```



Gambar 3.11 Forward Modelling pada shot ke 50

### 3.2.5 Travel Time Eikonal

Proses ini bertujuan untuk mendapatkan data travel time dari setiap grid. Perhitungan waktu tempuh menggunakan rumus ( 2-17 ). Dengan mendapatkan data travel time maka dapat ditentukan nilai kecepatan. Data travel time ini

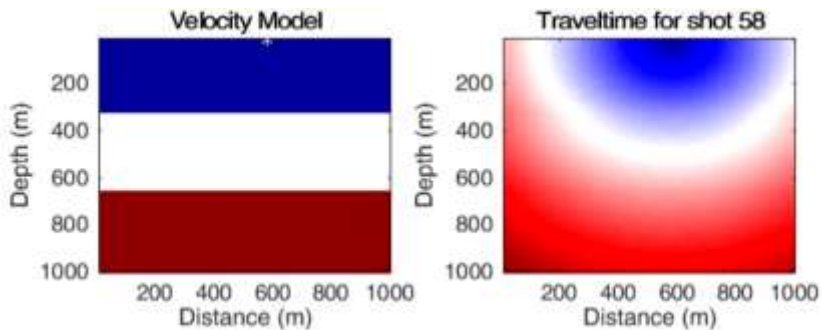


dibutuhkan untuk melakukan migrasi kirchhoff. Untuk menghitung traveltime menggunakan fungsi ray2d.m.

Berikut script untuk menghitung nilai waktu tempuh, dimana perhitungan dilakukan looping pada setiap shot (ixs). Hasil kemudian di simpan untuk digunakan pada proses berikutnya. Berikut skrip untuk menghitung travel time.

```
travelTime(:,:,ixs)=ray2d(velocityModel,[1 ixs],dx);
save('SaltModelData\travelTime.mat', 'travelTime')
```

Contoh hasil pemodelan waktu tempuh eikonal, seperti (Gambar 3.12).

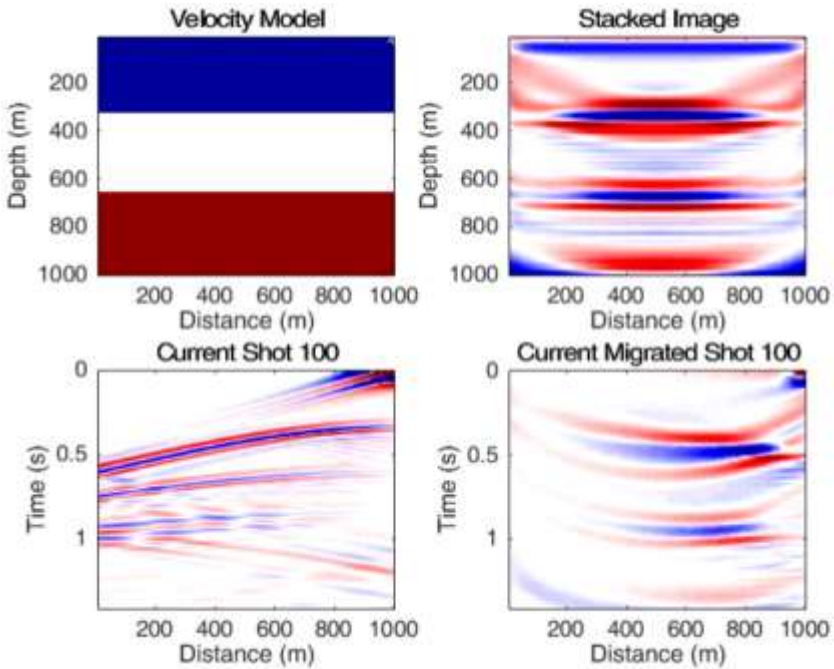


Gambar 3.12 Data Travel Time Eikonal shot 58

### 3.2.6 Kirchhoff Migration

Proses kirchhoff migration membutuhkan data travel time eikonal yang telah diproses sebelumnya, yang kemudian direkonstruksi menjadi hasil migrasi dari metode kirchhoff. Proses migrasi dilakukan secara pre-stack sehingga dilakukan looping dari shot 1 sampai shot ke n. Migrasi kirchhoff menggunakan script migrate.m. Berikut contoh hasil migrasi kirchhoff pada Gambar 3.13

```
function m = migrate(travelTime,shot,dt,nz,ixs,nx)
% Inputs:
%   travelTime    travel time
%   shot          shot (nz,nx)
%   dt            waktu interval
%   nz            jumlah data dalam kedalaman
%   ixs           titik grid lokasi shot
%
% Outputs:
%   m             hasil migrasi (nz,nx)
```



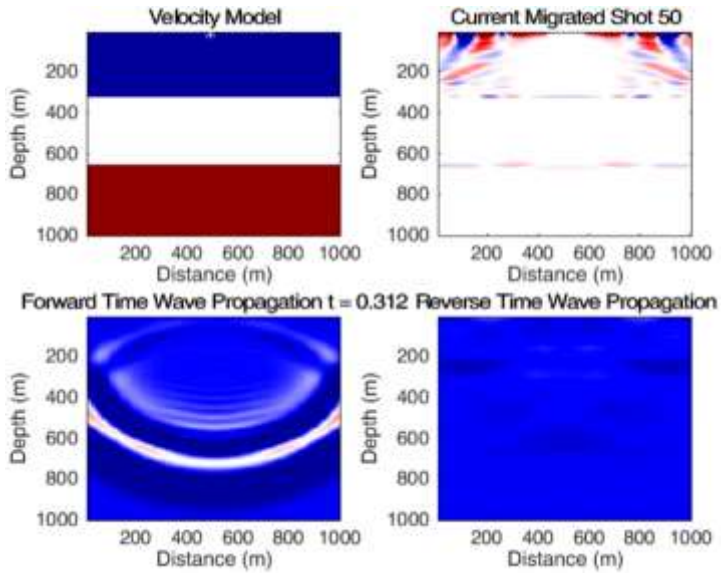
Gambar 3.13 Hasil Kirchhoff Migration pre-stack dan stack, model kecepatan, dan shot record

### 3.2.7 Reverse Time Migration

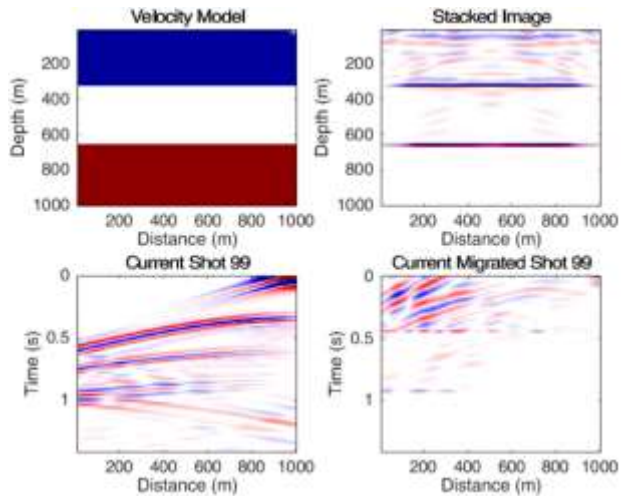
Proses reverse time migration melakukan propagasi 2 arah secara forward dan reverse modelling. Reverse progasi didapatkan dengan melakukan extrapolasi dari data shot record yang telah dilakukan pembalikan terhadap waktu. Algoritma reverse propagasi hampir sama dengan forward propagasi.

```
function [model snapshot] =
rtm2d(v,data,nz,dz,nx,dx,nt,dt)
% data(nx,nt)          shot record
% v(nz,nx)            data kecepatan
% nx                  banyak data horizontal
% nz                  banyak data verikal
% nt                  banyak time sampels
% dx                  jarak antar titik horizontal
% dz                  jarak antar titik vertikal
% dt                  sampel interval
```

Berikut hasil pemodelan reverse time migration pada (Gambar 3.14) & (Gambar 3.15).



Gambar 3.14 Reverse wave propagation, migrasi Reverse Time Migration Shot 50

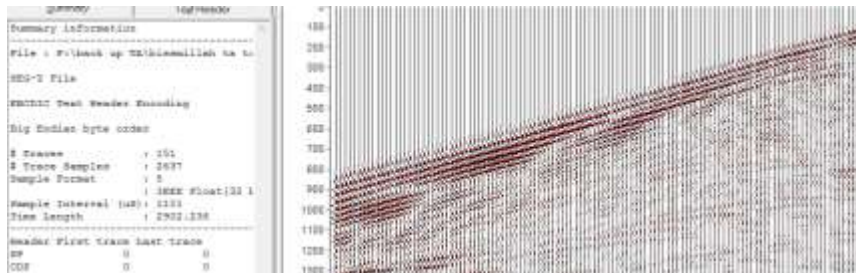


Gambar 3.15 Hasil Reverse Time Migration pre-stack dan stack, Model Kecepatan, dan Shot Record

### 3.2.8 Analisis Hasil

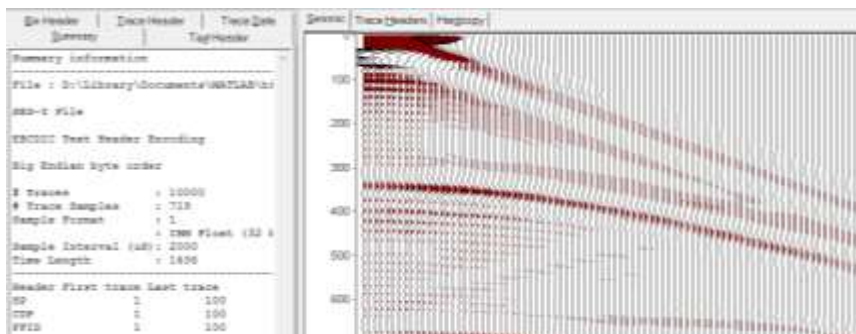
Proses forward modelling, eikonal, kirchhoff migration maupun RTM dilakukan pada software Matlab. Menggunakan script yang disempurnakan oleh Stuart Kozola pada tahun 2011, berdasarkan contoh model dari Gerard Schuster's pada buku Seismic Interferometry pada tahun May 2009.

Selanjutnya data di export kedalam bentuk .sgy agar dapat diolah selanjutnya pada software processing pada umumnya. Proses export data menggunakan script allwrite.sgy dari crewes. Berikut hasil data dalam .sgy pada Gambar 3.16.



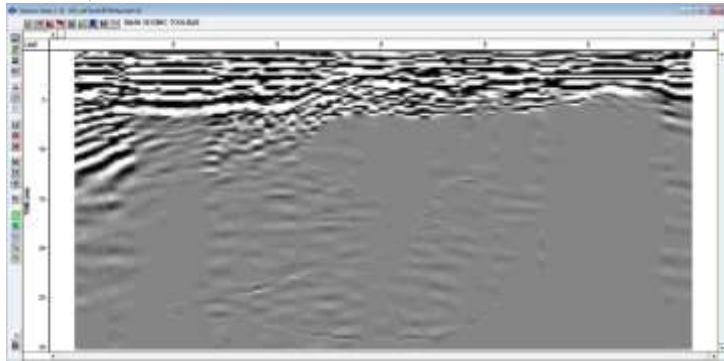
Gambar 3.16 Shot Record dalam bentuk .sgy

Setelah data menjadi .sgy, dilakukan gather data menggunakan *wsegycat*, diberikan data header menggunakan bantuan software tesseract. Geometri pengukuran disamakan dengan geometri pada pengukuran di matlab. Setelah didapatkan seismik sintetik dari tesseract selanjutnya akan dilakukan export header dari seismik sintetik ke dalam data .txt. Kemudian data header di import ke seismik hasil matlab untuk mendapatkan header data. Berikut data seismik jika sudah ditambahkan data header pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Shot record setelah ditambahkan data header

Kemudian dilakukan pengaturan display pada software vista untuk tampilan (Gambar 3.18)



Gambar 3.18 Display pada Software Vista

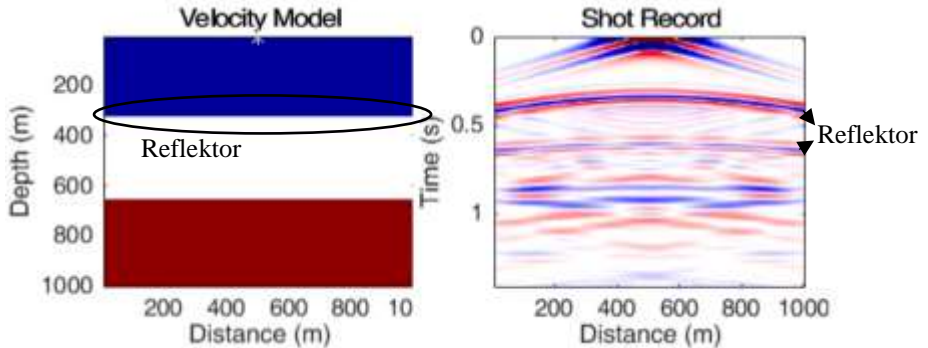
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

### PEMBAHASAN

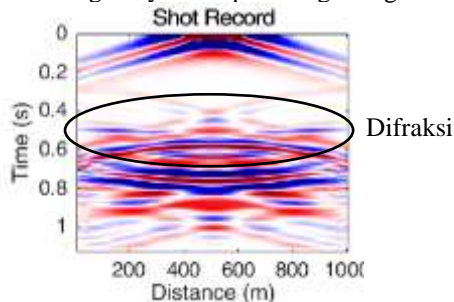
#### 4.1 Forward Modelling Model

Proses forward modelling menjelaskan bagaimana proses penjalaran gelombang seismik. Seismik menjelaskan lebih ke batas antar lapisan bukan dalam interval lapisan. Dengan kata lain saat penjalaran seismik jika bertemu dengan batas perlapisan yang sangat kontras maka akan tereflekesikan, bidang batas ini disebut dengan reflektor (Gambar 4.1).



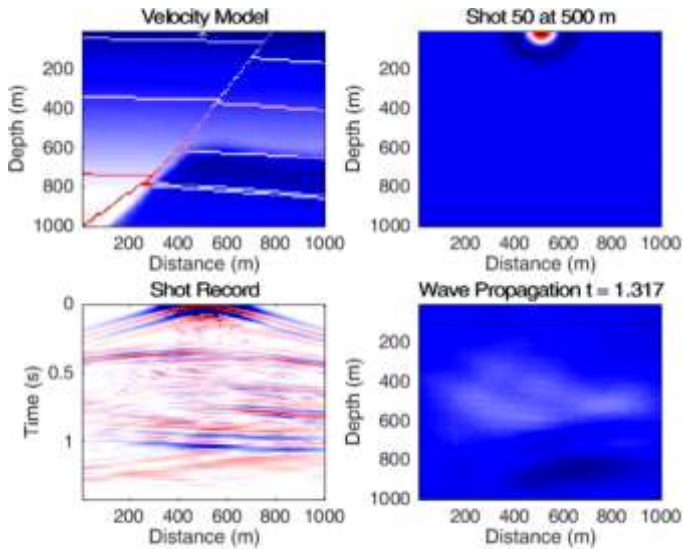
Gambar 4.1 Penjelasan Reflektor

Proses penjalaran gelombang telah menggunakan prinsip *full wave equation* dimana telah menyelesaikan permasalahan prinsip Huygens. Fenomena Huygens ini menghasilkan beberapa permasalahan seperti efek difraksi (Gambar 4.2). Sebagai contoh pada model sinklin terjadi fenomena bow tie pada shot record. Propagasi gelombang menjelaskan bagaimana gelombang merambat melalui medium hingga prosesnya tercatat menjadi shot record. Dapat diketahui dari shot record event seismik reflektor, difraksi, multiple, direct wave, noise dan lain lain. Salah satu manfaat migrasi yaitu dapat menghilangkan efek difraksi.

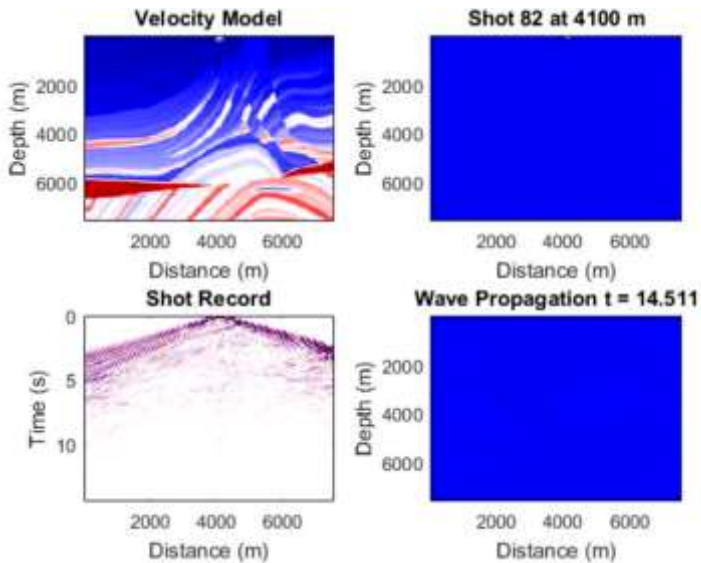


Gambar 4.2 Fenomena Bow Tie Pada Shot Record

Hasil forward modelling untuk masing masing model patahan, marmousi, dan salt dome dapat dilihat pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5.

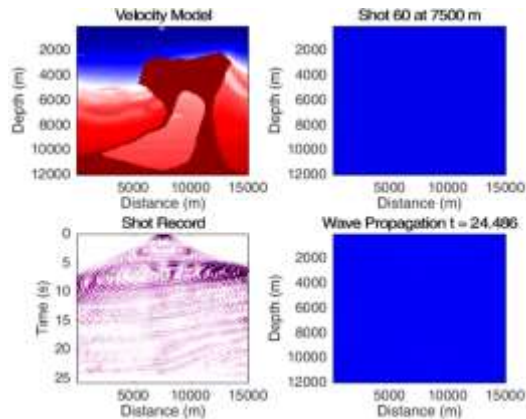


Gambar 4.3 Forward Modelling Data Patahan



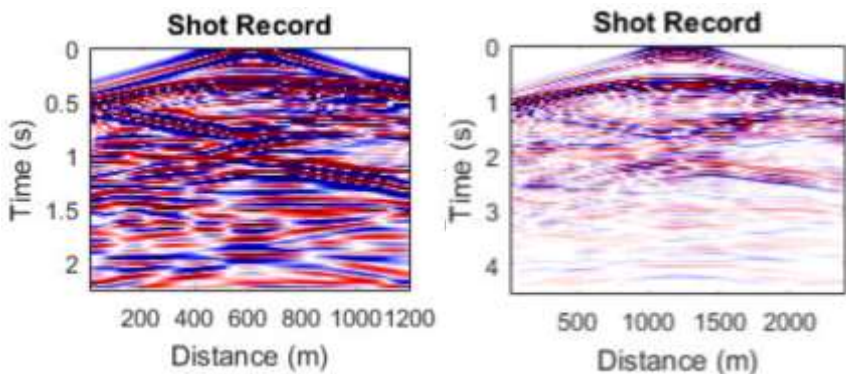
Gambar 4.4 Forward Modelling Data Marmousi





Gambar 4.5 Forward Modelling Data Salt Dome

Hasil forward modelling dipengaruhi oleh parameter akusisi. Parameter yang diatur seperti besar kecilnya nilai  $dx$  dan  $dz$ . Semakin kecil nilai  $dx$  dan  $dz$  maka semakin rapat nilai amplitudo dikarenakan jarak antar titik yang rapat dan dipengaruhi juga dengan model kecepatan. Jika selisih nilai kecepatan tidak terlalu besar maka boleh melakukan  $dx$  dan  $dz$  yang kecil akan tetapi jika selisih kecepatan sangat besar seperti data salt dome maka hal ini sangat penting untuk diperhatikan. Pada Gambar 4.6 dijelaskan tentang pengaruh nilai  $dx$  dan  $dz$ .

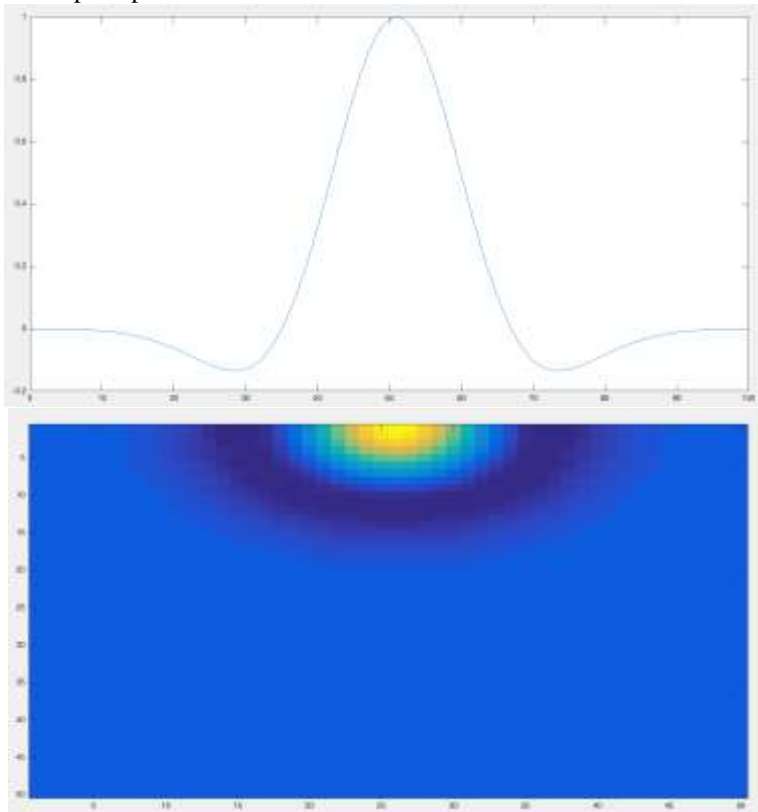


Gambar 4.6 Gambar shot record jika  $dx$  dan  $dz$  bernilai 10 m (kiri), gambar shot record jika  $dx$  dan  $dz$  bernilai 20 (kanan) menggunakan frekuensi = 30

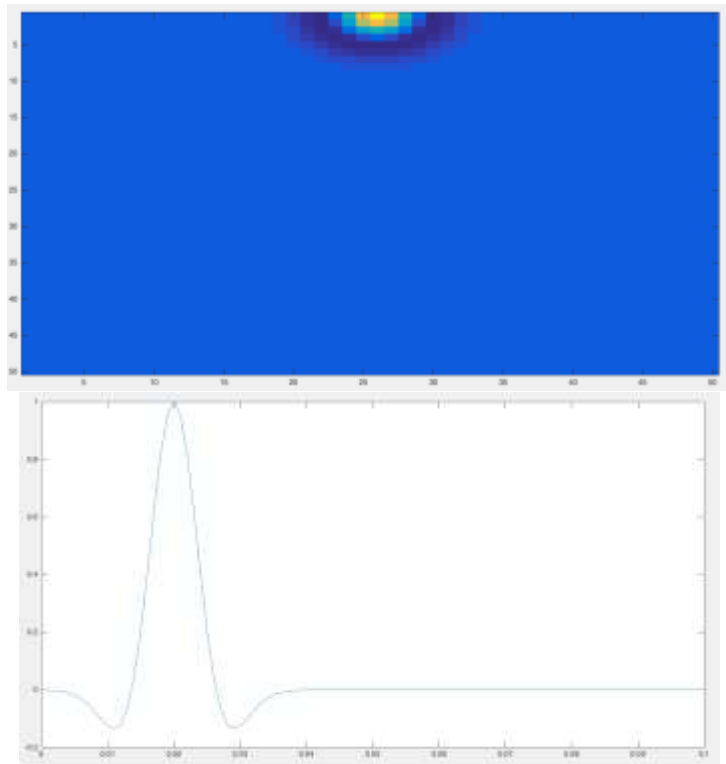
Hal lain yang mempengaruhi forward modelling yaitu nilai frekuensi. Semakin kecil nilai frekuensi maka semakin rapat juga nilai amplitudo. Semakin kecil nilai frekuensi maka akan mempengaruhi parameter gelombang sebagai

*initial wavefield* atau parameter gelombang awal yang digunakan. Pada penelitian ini menggunakan gelombang ricker.

Pengaruh besar kecilnya frekuensi akan mempengaruhi hasil forward modelling berdasarkan data velocity. Frekuensi yang kecil memiliki penetrasi yang besar dan energi yang besar pula sehingga dapat melalui kontras velocity yang besar seperti data salt dome maupun vulkanik yang ditandai dengan pembesaran nilai amplitudo. Namun jika nilai frekuensi terlalu besar ada kemungkinan bahwa gelombang tidak dapat merambat. Nantinya frekuensi ini digunakan dalam kebutuhan interpretasi. Semakin kecil frekuensi maka resolusi seismik akan menjadi besar, sebaliknya semakin besar frekuensi maka resolusi seismik akan menjadi kecil. Contoh penjelasan frekuensi pada gelombang ricker dijelaskan pada pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.

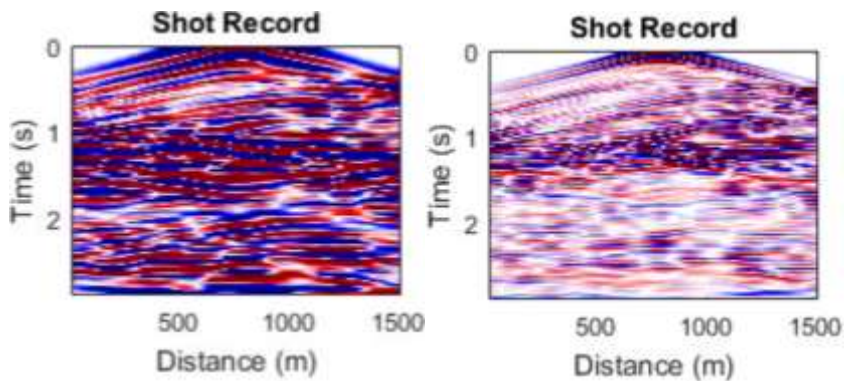


Gambar 4.7 Gelombang ricker frekuensi = 20 Hz



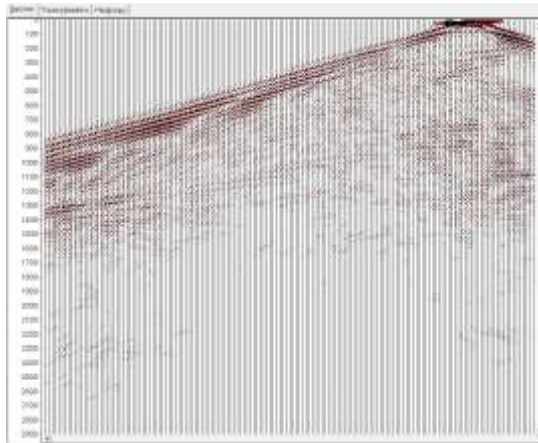
Gambar 4.8 Gelombang Ricker dengan frekuensi  $f = 50$  Hz

Berikut hasil variasi nilai frekuensi pada shot record, terlihat bahwa terjadi perbedaan kerapatan nilai amplitudo yang diterangkan pada Gambar 4.9.



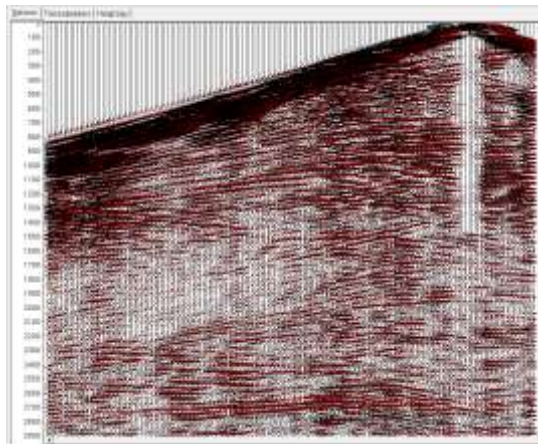
Gambar 4.9 Shot record frekuensi = 20 (kiri), frekuensi = 50 (kanan)

Setelah dilakukan running forward modelling, selanjutnya data di diubah menjadi format .sgy untuk selanjutnya dapat dilakukan analisis frekuensi maupun gaining dan dapat dilanjutkan analisis pada software processing umum. Berikut data shot 30 marmousi sebelum dilakukan AGC (Automatic Gain Control) pada Gambar 4.10. AGC adalah salah satu metode gaining untuk dalam melakukan pengaturan nilai amplitudo. Terlihat pada daerah dengan time record yang besar nilai amplitudo hampir tidak terlihat.



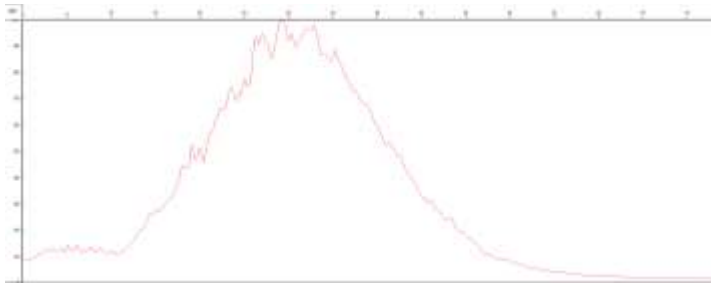
Gambar 4.10 Shot 130 Data Marmousi sebelum dilakukan AGC

Berikut Setelah dilakukan AGC shot 30 data marmousi, event seismik lebih terlihat (Gambar 4.11).



Gambar 4.11 Shot 130 Data Marmousi setelah dilakukan AGC

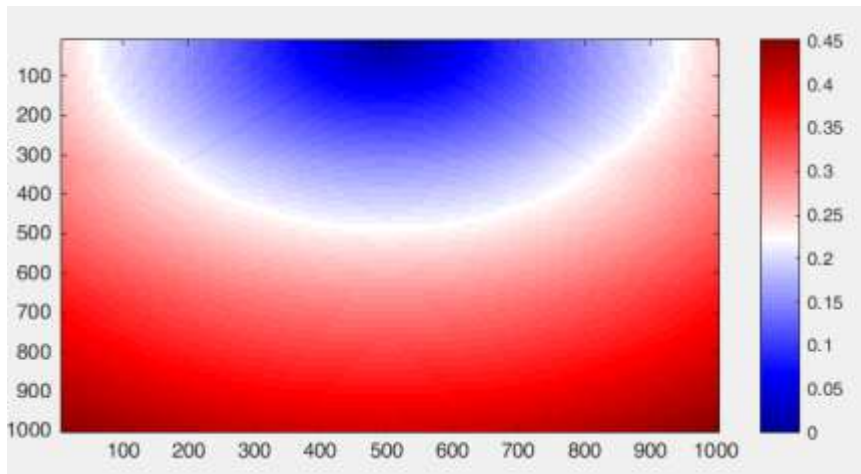
Berikut analisis nilai amplitudo spectrum data Marmousi (Gambar 4.12).



Gambar 4.12 Amplitudo Spectrum Shot 130 Data Marmousi

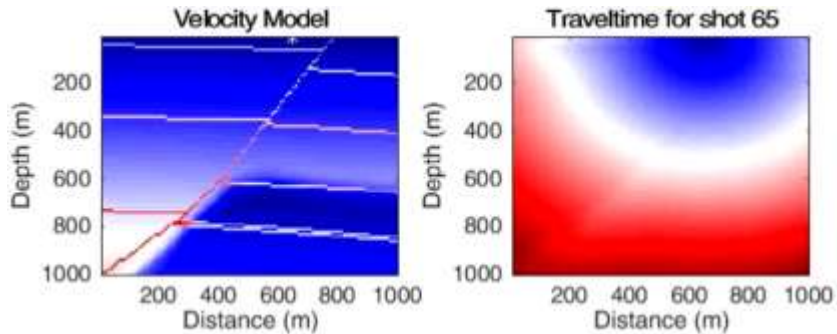
#### 4.2 Travel Time Eikonal

Travel time eikonal menjelaskan permasalahan perhitungan travel time pada model berdasarkan data kecepatan. Hasil travel time digunakan untuk menghitung nilai waktu tempuh pada setiap grid kemudian dilakukan konturing. Tujuan eikonal ini untuk membantu dalam menyelesaikan permasalahan pada velocity analysis dan migrasi. Dengan didapatkan waktu tempuh *travel time* dan diketahui nilai jarak maka akan diketahui nilai kecepatan interval maupun kecepatan RMS. Data travel time ini mengefisiensikan pekerjaan untuk masalah velocity analysis dengan mempunyai data travelttime maka tidak perlu melakukan picking velocity. Berikut perhitungan travel time data patahan pada shot ke 50 di titik 500 pada Gambar 4.13.

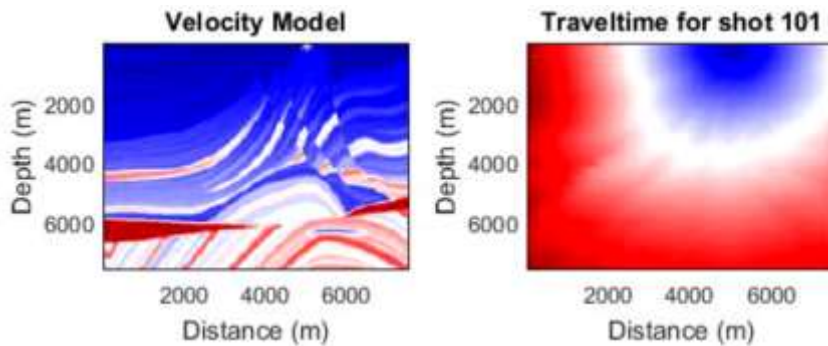


Gambar 4.13 Data Travel Time patahan pada shot 50 di titik 500

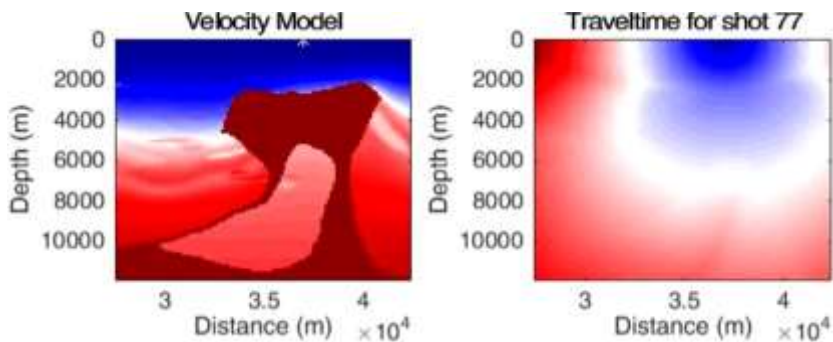
Hasil perhitungan travel time untuk masing-masing model patahan, marmousi, dan salt dome dapat dilihat pada Gambar 4.14, Gambar 4.15, dan Gambar 4.16



Gambar 4.14 Travel time Eikonal data Patahan



Gambar 4.15 Travel time Eikonal Data Marmousi

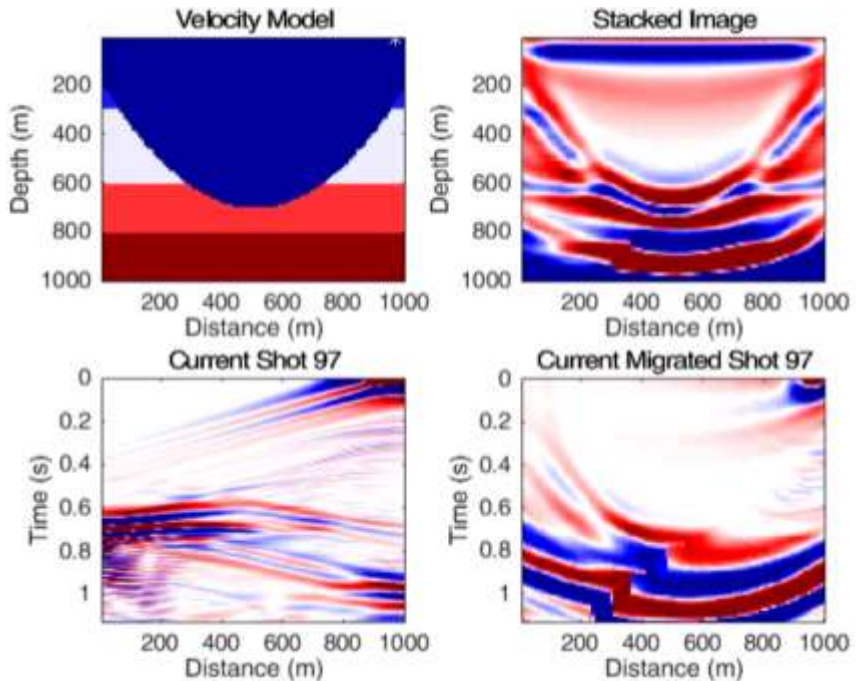


Gambar 4.16 Travel time Eikonal Data Salt Dome



### 4.3 Analisis Hasil Migrasi Kirchhoff dan Reverse Time Migration

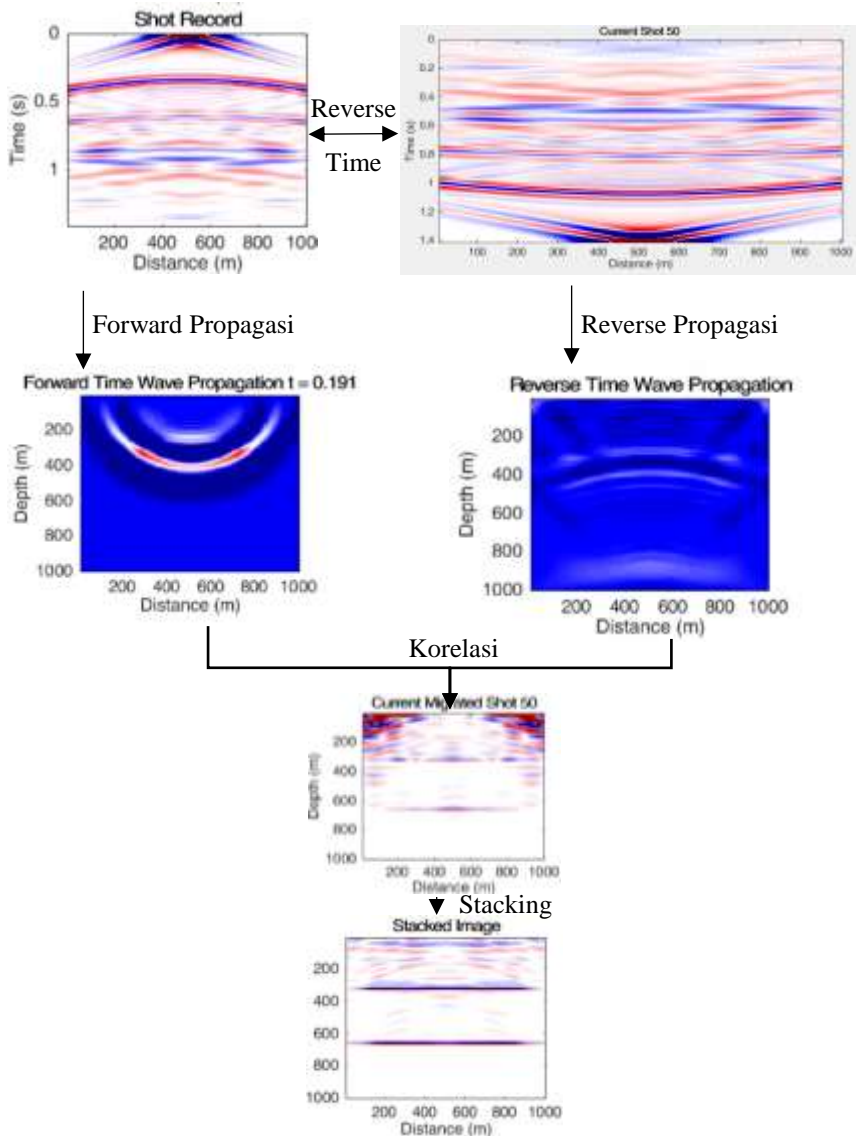
Migrasi bertujuan untuk mengembalikan posisi reflektor yang miring ke posisi semula. Perbedaan posisi reflektor yang miring ini disebabkan karena adanya perbedaan lapisan dari muka bumi. Dengan adanya migrasi dapat mengembalikan posisi reflektor ke posisi sebenarnya serta membuat model lebih natural dalam kondisi geologi. Dilakukan migrasi dengan metode *kirchhoff* dan *Reverse Time Migration*. Metode migrasi termasuk dalam klasifikasi pre-stack depth migration. Dilakukan migrasi pre-stack yaitu dilakukan migrasi sebelum dilakukan stacking dalam shot gather. Setelah didapatkan hasil migrasi per shot maka dijumlahkan (*stacking*) membentuk data *stack*. Output migrasi yaitu dalam domain kedalaman. Berikut hasil migrasi pada model sinklin pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Kirchhoff Migration Data Sinklin

Reverse time migration adalah salah satu teknik migrasi yang memanfaatkan prinsip gelombang naik dan turun. Pada saat gelombang tersebut menghantam suatu perlapisan maka akan menghasilkan gelombang naik. Saat terbentuknya gelombang naik dan gelombang turun baru maka akan diprediksi sebagai lapisan. Caranya dengan membalikkan (*reverse*) nilai *shot record* terhadap nilai waktu. Setelah reverse maka akan dimodelkan penjalaran gelombangnya dalam *reverse time propagation*. Metode ini menggunakan

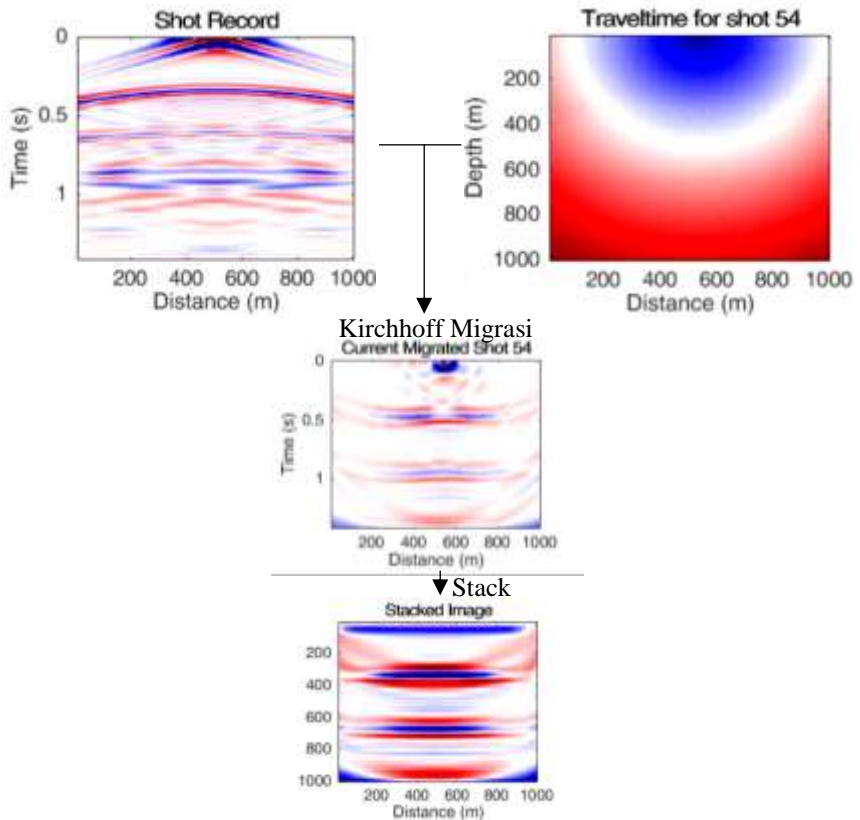
prinsip ekstrapolasi ekstrem karena tidak terdapat data asli. Propagasi terbalik ini dimulai dari saat gelombang dicatat pada geophone hingga membentuk kembali menjadi source gelombang dijelaskan pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Metode Reverse Time Migration



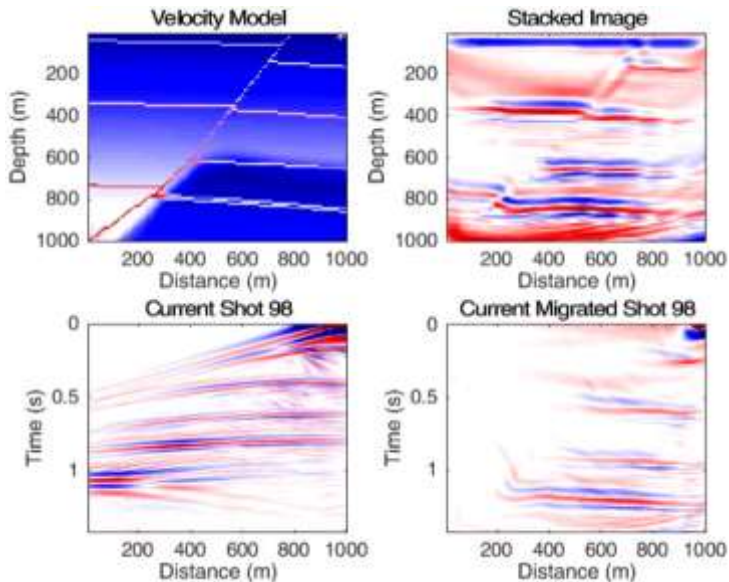
Sedangkan Metode Kirchhoff Migration memanfaatkan waktu tempuh travel time eikonal untuk melakukan penjumlahan kurva difraksi (*diffraction summation*) diterangkan pada Gambar 4.19.



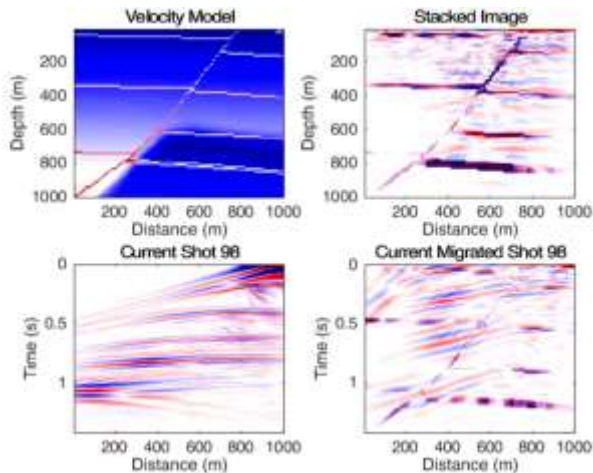
Gambar 4.19 Metode Kirchhoff Migration

Dilakukan migrasi pada data sederhana: 3 lapis, sinklin, patahan, dan data geologi yang kompleks: salt dome, dan marmousi. Dari hasil migrasi akan dibandingkan hasil dalam bentuk pre-stack maupun setelah dilakukan stack.

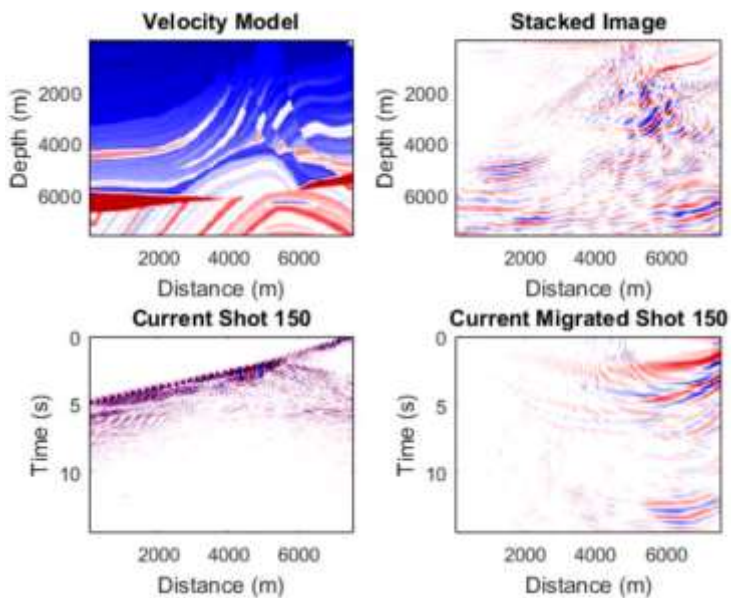
Hasil Kirchhoff Migration untuk masing-masing model patahan, marmousi, dan, salt dome dapat dilihat pada Gambar 4.20, Gambar 4.22, dan Gambar 4.24. Hasil Reverse time migration untuk masing-masing model patahan, marmousi, dan, salt dome dapat dilihat pada Gambar 4.21, Gambar 4.23, dan Gambar 4.25.



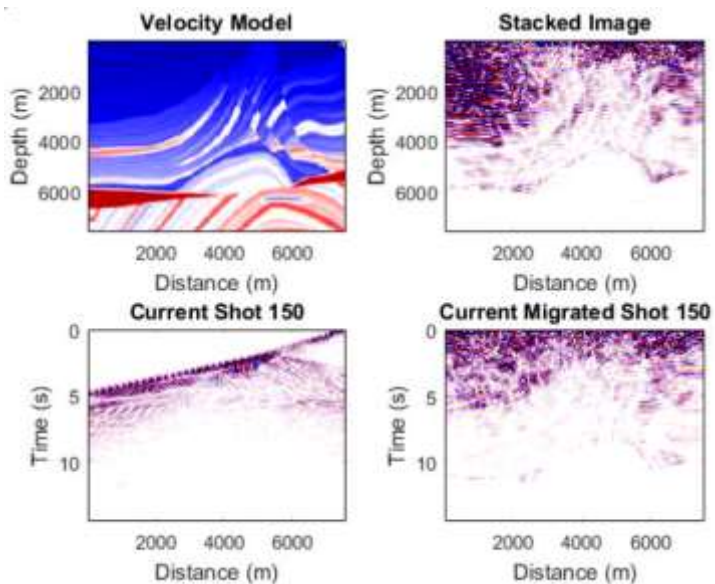
Gambar 4.20 Hasil kirchhoff Migration data patahan



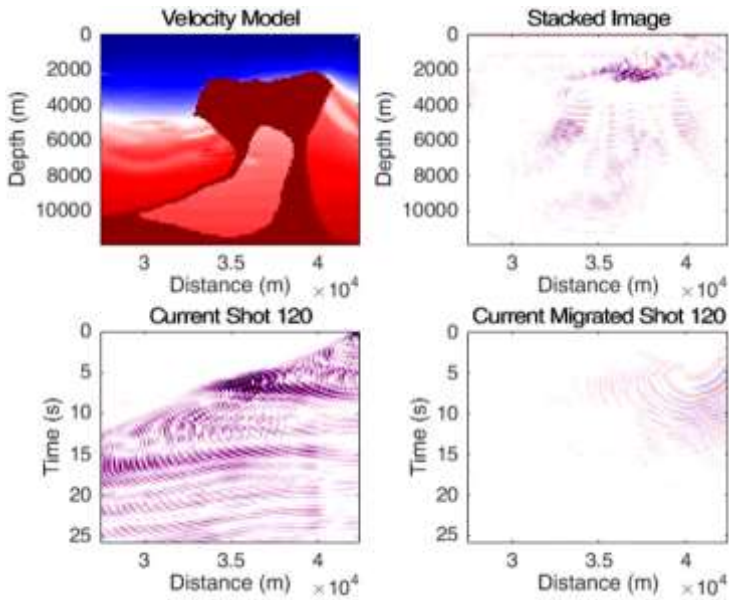
Gambar 4.21 Hasil Reverse Time Migration Data Patahan



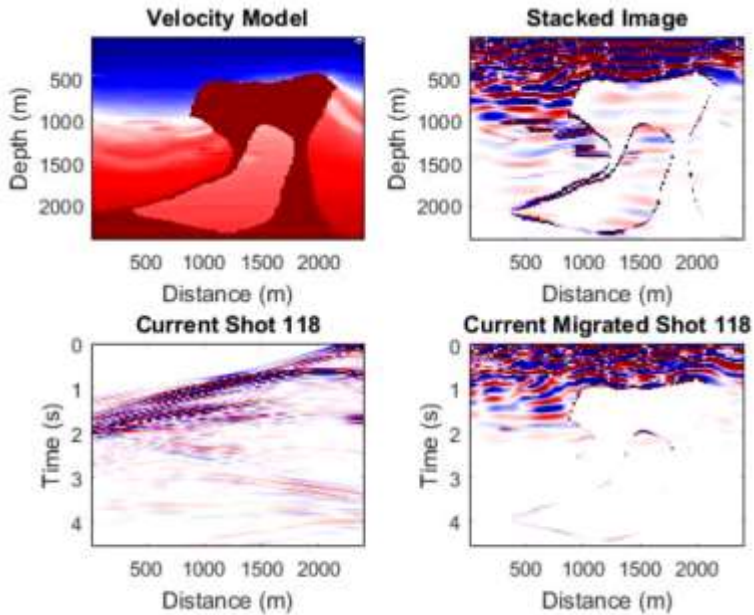
Gambar 4.22 Hasil Kirchhoff Migration Data Marmousi



Gambar 4.23 Hasil Reverse Time Migration Data Marmousi

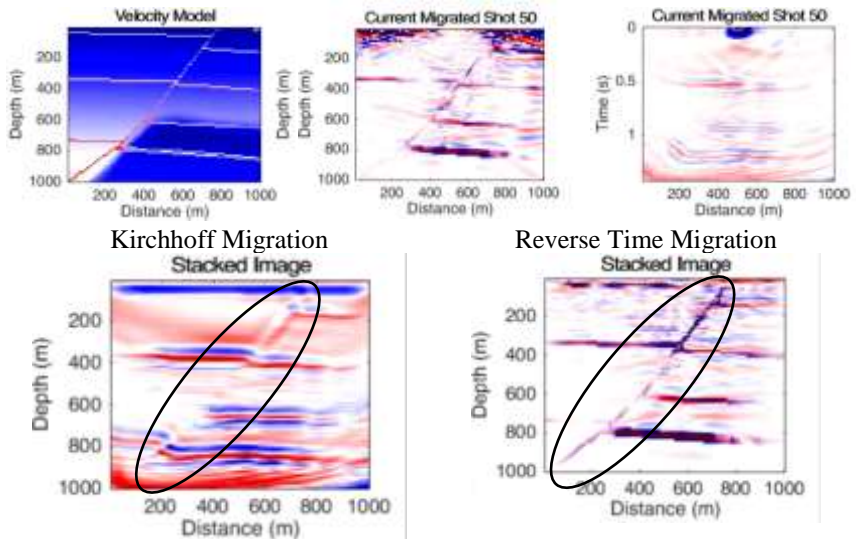


Gambar 4.24 Hasil kirchhoff Migration Data Salt Dome



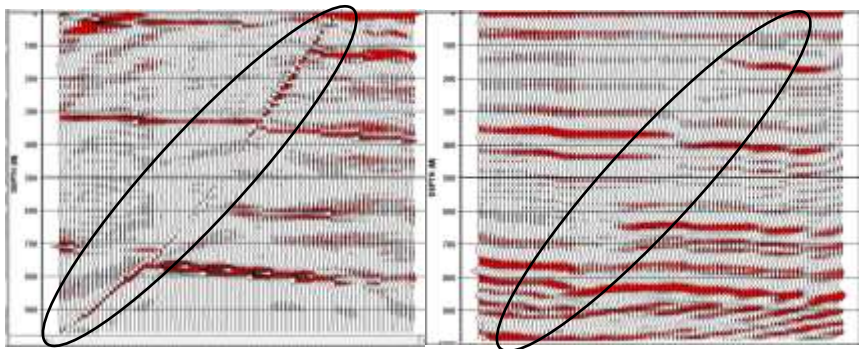
Gambar 4.25 Hasil Reverse Time Migration Data Salt Dome

Hasil migrasi model patahan pada Gambar 4.26 terlihat bahwa hasil dari kirchhoff migration telah dapat melakukan imaging pada daerah patahan namun hasil reverse time migration lebih jelas dalam melakukan imaging pada daerah patahan. Dari hasil pre-stack migration pada shot 50 yang mana memiliki *fold* yang paling besar, hasil reverse time migration memberikan hasil yang lebih baik.



Gambar 4.26 Perbandingan Hasil Migrasi Data Patahan

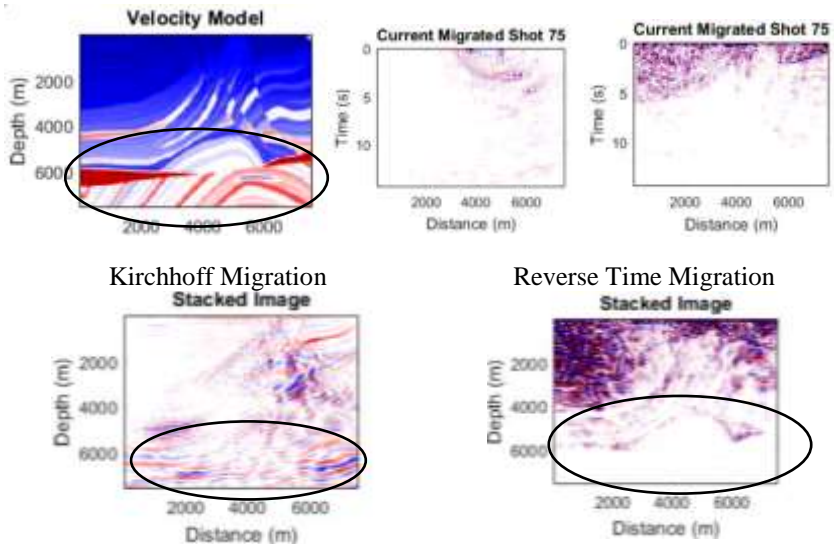
Kemudian dilakukan pengaturan tampilan (Gambar 4.27).



Gambar 4.27 Hasil tampilan RTM (kiri) dan Kirchhoff Migration (kanan) Data Patahan

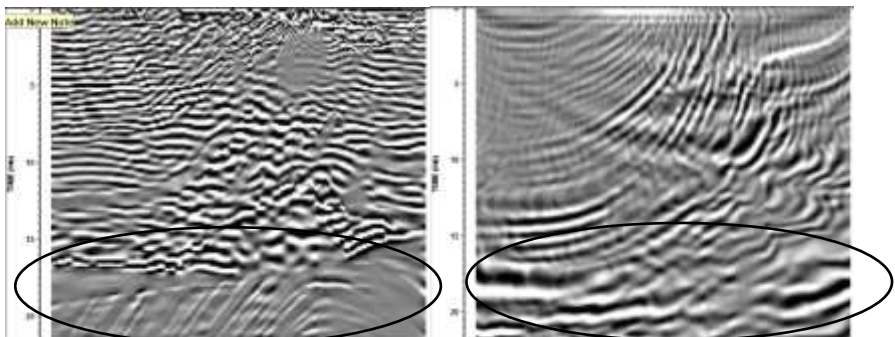


Hasil Migrasi model Marmousi pada Gambar 4.28 terlihat bahwa hasil dari kirchhoff migration belum dapat melakukan imaging pada daerah kemiringan (dip) dengan baik sedangkan hasil reverse time migration lebih jelas dalam melakukan imaging pada daerah antiklin yang ditunjukkan pada lingkaran hitam. Dari hasil pre-stack migration pada shot 75 yang mana memiliki nilai fold terbesar, hasil reverse time migration memberikan hasil yang lebih bagus.



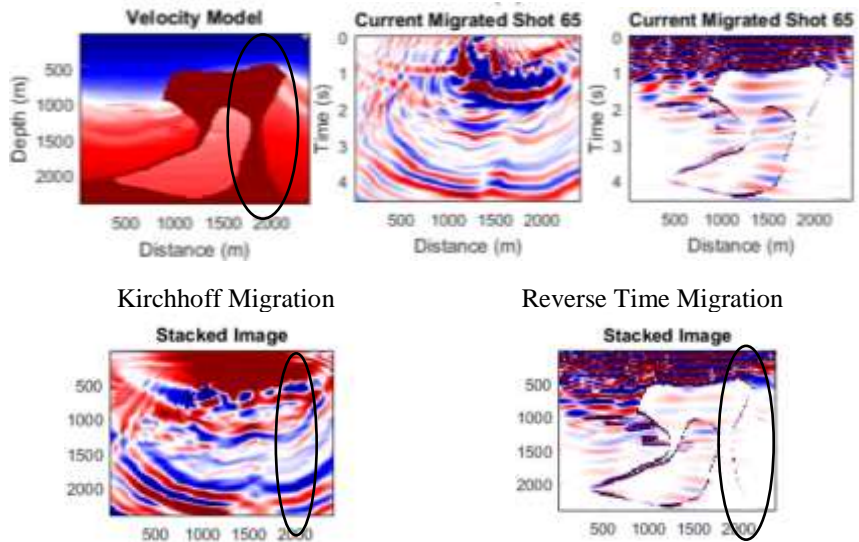
Gambar 4.28 Perbandingan Hasil Migrasi Data Marmousi

Kemudian dilakukan pengaturan tampilan (Gambar 4.29)

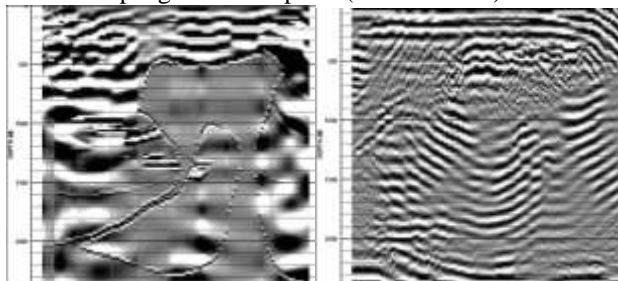


Gambar 4.29 Hasil tampilan RTM (kiri) dan Kirchhoff Migration (kanan) Data Marmousi

Hasil Migrasi model salt dome pada Gambar 4.30 terlihat bahwa hasil dari kirchhoff migration belum dapat melakukan imaging pada daerah dip dengan cukup baik sedangkan hasil reverse time migration lebih jelas dalam melakukan imaging pada daerah body salt dome yang ditunjukkan pada lingkaran hitam. Pada daerah dip di time 2000 ms pada jarak 2000 m terlihat bahwa dari hasil reverse time pun belum dapat melakukan imaging dip yang baik namun hal tersebut menurut penulis wajar karena terdapat pada bagian pinggir pengukuran. Jika dilakukan penambahan daerah pengukuran maka akan dapat melakukan imaging dipping dengan lebih baik. Dari hasil pre-stack migration pada shot 65 hasil reverse time migration memberikan hasil yang lebih baik.



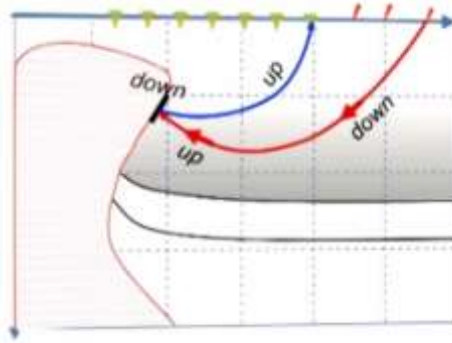
Gambar 4.30 Perbandingan hasil migrasi data salt dome  
Kemudian dilakukan pengaturan tampilan (Gambar 4.31)



Gambar 4.31 Hasil tampilan RTM (kiri) Kirchhoff Migration (kanan) data salt dome

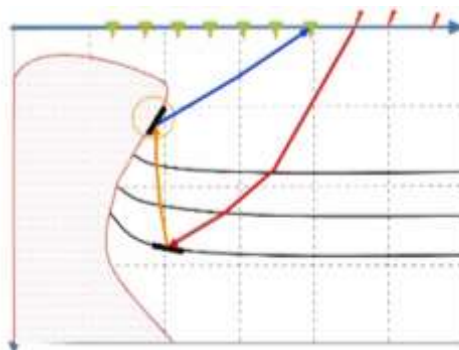
#### 4.3.1 Analisis waveform

Salah satu jenis waveform yaitu turning waves. Turning waves adalah gelombang yang terjadi pemantulan akibat adanya gradasi dari nilai kecepatan, gradasi ini disebabkan karena kecepatan yang tidak kontras sehingga tidak dapat berperan sebagai reflektor. Ketika gelombang turun merambat maka gelombang turun tersebut berubah menjadi naik dan menghantam reflektor, gelombang tersebut kemudian terpantulkan turun kemudian kembali naik ke arah receiver. Turning waves ini dapat diolah dengan metode kirchhoff migration maupun reverse time migration (Gambar 4.32).



Gambar 4.32 Waveforms Turning Waves

Prism waves adalah gelombang yang dihasilkan dari 2 kali pantulan reflektor. Ketika gelombang merambat turun gelombang akan terjadi pantulan dikarenakan ada body salt dome dengan dipping yang ekstrem sehingga gelombang terjadi pantulan ke dua kalinya. Prism waves dapat diolah pada metode reverse time migration sehingga menghasilkan batas perlapasan yang jelas dengan kemiringan ekstrem (Gambar 4.33).



Gambar 4.33 Waveforms Prism Waves



#### 4.3.2 Analisis Komputasi

Dari hasil analisis waktu, penyimpanan, serta kebutuhan perangkat komputasi antara metode kirchhoff migration dan reverse time migration, disimpulkan bahwa dari bagian perangkat lunak dan perangkat keras metode reverse time migration membutuhkan perangkat yang memiliki spesifikasi tinggi. Hal ini akan mempengaruhi dalam waktu komputasi. Sedangkan kirchhoff migration lebih *reliable* dan *fleksibel* karena tidak terlalu membutuhkan perangkat komputasi yang canggih. Namun dari hal tersebut dapat disesuaikan tergantung kebutuhan. Kebutuhan dari segi kompleks data maupun perangkat komputer pendukung. Dari waktu komputasi, RTM membutuhkan waktu yang lebih lama daripada kirchhoff. Dengan perbandingan yang hiperbola. Lama waktu komputasi juga akan mempengaruhi besar size penyimpanan data. Lama waktu komputasi dan penyimpanan data dipengaruhi oleh besar kecil nilai kecepatan, nilai  $dx$  &  $dz$ , serta nilai frekuensi yang sudah dijelaskan sebelumnya. Berikut hasil analisis komputasi, dengan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak yang sama pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

- Spesifikasi Laptop

Processor : Intel ® Core <sup>TM</sup> i7-6700HQ CPU @ 2.60 GHz (8 CPUs)

GPU : NVIDIA GTX 970M (CUDA)

RAM : 16 Gb DDR IV

- Perangkat lunak

MATLAB R2016b (Paralel Computing toolbox extension)

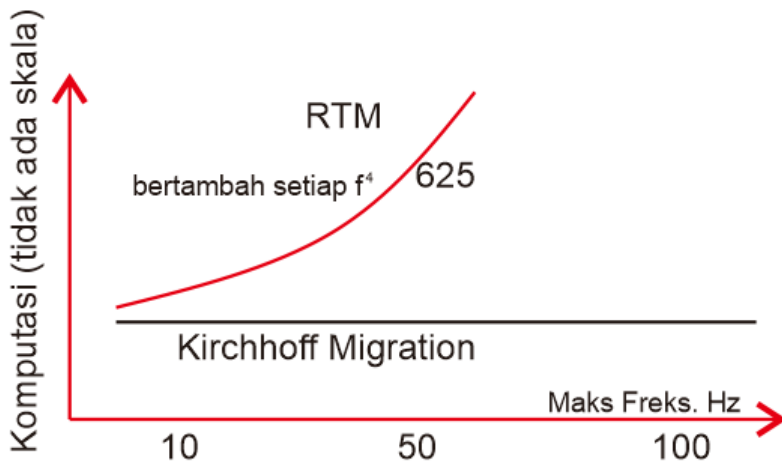
Tabel 4.1 Tabel Waktu Komputasi

<b>Waktu Komputasi</b>	<b>Data Patahan</b>	<b>Data Marmousi</b>	<b>Data Salt Dome</b>
Forward Modelling	± 30 menit	± 3 jam	± 2 jam
Kirchhoff Migration	± 5 menit	± 15 menit	± 10 menit
RTM	± 40 menit	± 4 jam	± 3 jam
Total	± 1,5 jam	± 8 jam	± 6 jam

Tabel 4.2 Tabel Penyimpanan Data

Penyimpanan Data	Data Patahan	Data Marmousi	Data Salt Dome
Forward Modelling	14.4 Gb	92 Gb	32.5 Gb
Kirchhoff Migration	123 Mb	584 Mb	32.1 Mb
RTM	14.1 Gb	91 Gb	25.3 Gb
Total	28.6 Gb	184 Gb	64.6 Gb

Berdasarkan percobaan dilakukan dibuat grafik komputasi antara *kirchhoff migration* dan *reverse time migration*, grafik ini berpatokan dengan hasil kesimpulan grafik yang dibuat oleh Etienne Robein, EAGE, 2017



Gambar 4.34 Grafik Komputasi Kirchhoff Migration VS RTM

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

Metode RTM lebih baik dalam melakukan *imaging* daripada metode *kirchhoff migration* yang dibuktikan dengan hasil pencitraan yang lebih mendekati model asli. Berikut rincian keunggulan metode RTM dibandingkan dengan *kirchhoff migration*: Metode RTM stabil dalam model geologi yang kompleks sedangkan *kirchhoff* tidak; Metode RTM dan *kirchhoff* sama-sama tidak memiliki keterbatasan dip; Metode RTM dan *kirchhoff* sama-sama menangani turning waves; Metode RTM menangani prism waves sedangkan *kirchhoff* tidak.

Namun walaupun begitu metode *reverse time migration* memerlukan upaya komputasi yang lebih besar daripada metode *kirchhoff migration*. Hal ini dapat disesuaikan sesuai kebutuhan.

#### **5.2 Saran**

Berikut saran yang diberikan penulis apabila ingin mengembangkan penelitian ini:

1. Mengembangkan metode dari *reverse time migration* (RTM) menjadi *Least square reverse time migration* (LSRTM).
2. Perlu dilakukan adanya penyelesaian permasalahan dalam amplitudo agar data siap untuk dilakukan proses interpretasi lebih lanjut.
3. Perlu adanya analisis Q migrasi dari data *reverse time migration*, serta melakukan pemberian atenuasi pada proses forward modelling bila perlu.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Alkhalifah, T., and 2010 S. Fomel. 2010. "An Eikonal Based Formulation for Traveltime Perturbation with Respect to the Source Location." *Geophysics* 75 (6): 175–83. doi:10.1190/1.3490390.
- Baysal, Edip, Dan D Kosloffs, and John W C Sherwood. 1983. "Reverse Time Migration." *Geophysics* 48: 1514–24. doi:10.1190/1.1441434.
- Bednar, J Bee. 2005. "A Brief History of Seismic Migration." *Geophysics* 70 (3): 3–20. doi:10.1190/1.1926579.
- Berkhout, A J. 1981. "Wave Field Extrapolation Techniques in Seismic Migration , a Tutorial." *Geophysics* 46 (12): 1638–56. doi:10.1190/1.1441172.
- Berryman, J.G. 1991. *Lecture Notes on Nonlinear Inversion and Tomography*.
- Bishop, T.N., K.P Bube, R.T Cutler, R.T Langan, and P.L Love. 1985. "Tomographic Determination of Velocity and Depth in Laterally Varying Media." *Geophys*, no. 50: 903–23.
- Boechat, João Batista, Paulo M. Cunha, and Djalma M. Soares Filho. 2007. "A 3D Reverse Time Migration Scheme for Offshore Seismic Data," 2427–31. doi:10.1190/1.2792971.
- Chapman, C. 2004. *Fundamentals of Seismic Wave Propagation*. Cambridge University Press.
- Claerbout, Jon f., and S.M. Doherty. 1972. "Downward Continuation of Moveout-Corrected Seismograms." *Geophysics* 37: 741–68. doi:10.1190/1.1440298.
- Dirk, Gajewski, Coman Radu, and Claudia Vanelle. 2002. "AMPLITUDE PRESERVING KIRCHHOFF MIGRATION : A TRAVELTIME BASED STRATEGY." *Studia Geophysica et Geodaetica* 46: 193–211. doi:10.1023/A:1019849919186.
- Feng, Zongcai, and Gerard T Schuster. 2017. "Elastic Least-Squares Reverse Time Migration." *GEOPHYSICS* 82 (2): 143–57. doi:10.1190/geo2016-0254.1.
- Feng, Zongcai, Gerard T Schuster, and King Abdullah. 2016. "Elastic Least-Squares Reverse Time Migration," 4163–67. doi:10.1190/segam2016-13863861.1.
- Gazdag, Jenii. 1978. "Wave Equation Migration with the Phase-Shift Method."

- Geophysics* 43: 1342–51. doi:10.1190/1.1440899.
- Gray, Samuel H, John Etgen, Joe Dellinger, and Dan Whitmore. 2001. “Seismic Migration Problems and Solutions.” *Geophysics* 66 (5): 1622–40. doi:10.1190/1.1487107.
- Guo, J. 2002. “Towards Accurate Velocity Models by 3D Tomographic Velocity Analysis.” In *EAGE 64th Conference & Exhibition*. Houston, Texas.
- Hill, N Ross. 1990. “Gaussian Beam Migration.” *Geophysics* 55: 1416–28. doi:10.1190/1.1442788.
- Jones, Ian F, Mike C Goodwin, Ivan D Berranger, Hongbo Zhou, and Paul A Farmer. 2007. “Application of Anisotropic 3D Reverse Time Migration to Complex North Sea Imaging.” *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 26: 2140–44. doi:10.1190/1.2792911.
- Lamoureux, Michael P. 2006. “The Mathematics of PDEs and the Wave Equation.”
- McMechan. 1983. “Migration by Extrapolation of Time-Dependent Boundary Values.” *Geophys. Prospect*, 413–20. doi:10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x.
- Menke, William. 1984. *GEOPHYSICAL DATA ANALYSIS: Discrete Inverse Theory*. New York: Academic Press.
- Munadi, S. 1992. “Mengenal Tomografi Seismik.” Edited by Lemigas. *LPL* 3. Lemigas, Indonesia: 239–48.
- Poetri Monalia. 2011. “Analisis Model Kecepatan Berdsarkan Tomografi Refleksi Waktu Tempuh ( Travel-Time Tomography Reflection ) Tomografi Refleksi Waktu Tempuh ( Travel-Time Tomography Reflection ).” Universitas Indonesia.
- Qin, Fuhao, Vi Luo, Kim B Olsen, Wenying Cai, and Gerard T Schuster. 1992. “Finite-Difference Solution of the Eikonal Equation along Expanding Wavefronts.” *Geophysics* 57 (3): 478–87. doi:10.1190/1.1443263.
- Saito, Hideki. 1990. “3-D Ray-tracing Method Based on Huygens’ Principle.” *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1024–27.
- Scales, J.A. 1987. “No Title.” *Geophysics* 52: 179–85.
- Schneider, William A. 1978. “Integral Formulation for Migration in Two and Three Dimensions.” *Geophysics* 43: 49–76.

- Sheriff, Robert E. and Geldart, L.P. 1995. *Exploration Seismology*. Second edi. Cambridge University Press.
- Stolt, R.H. 1978. "Migration by Fourier Transform." *Geophysics* 43: 23–48. doi:10.1190/1.1440826.
- Sun, Yonghe, Fuhao Qin, Steve Checkles, and Jacques P Leveille. 2000. "3-D Prestack Kirchhoff Beam Migration for Depth Imaging." *Geophysics* 65 (5): 1592–1603. doi:10.1190/1.1444847.
- Trampert, Jeannot, and Jean-jacques Leveque. 1990. "Simultaneous Iterative Reconstruction Technique: Physical Interpretation Based on the Generalized Least Squares Solution." *Geophys* 95 (12): 553–59.
- Yilmaz, Ozdogan. 2001. *Seismic Data Analysis Volume II*. United States: Society of Exploration Geophysics.
- Zhang, Yu, and James Sun. 2009. "Practical Issues of Reverse Time Migration: True Amplitude Gathers, Noise Removal and Harmonic-source Encoding." *Beijing 2009 International Geophysical Conference and Exposition* 24 (6): 204–204. doi:10.1190/1.3603729.

## LAMPIRAN

```
addpath marmousi3ModelData
addpath migration

%% Read in velocity model data and plot it
load velocityModel
[nz,nx] = size(velocityModel);

dx = 50;
dz = 50;
x = (1:nx)*dx;
z = (1:nz)*dz;

subplot(2,2,1)
imagesc(x,z,velocityModel)
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth (m)');
title('Velocity Model');
hold on
hshot = plot(x(1),z(1),'w*');
hold off
colormap(seismic)
colorbar
%% Velocity model parameters
nz = 301;           % depth samples
dz = 2;             % depth spacing (m)
nx = 941;           % surface samples
dx = 12.5;          % surface spacing (m)

z = (0:nz-1)*dz;
x = (0:nx-1)*dx;
%% Resample
idx = 1:6:941;
x = x(idx);
nx = length(x);
idz = 1:2:301;
z = z(idz);
nz = length(z);
velocityModel = velocityModel(idz,idx);
imagesc(x,z,velocityModel)
colormap seismic
drawnow
```



```

%% Calculate parameters and plot
velocityModel=velocityModel(1:151,1:151)
[nz,nx] = size(velocityModel);
dx = 50;
dz = 50;
x = (1:nx)*dx;
z = (1:nz)*dz;
subplot(2,2,1)
imagesc(x,z,velocityModel)
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth (m)');
title('Velocity Model');
hold on
hshot = plot(x(1),z(1),'w*');
hold off
colormap(seismic)
%% Create shot gathers
% Use the velocity model to simulate a seismic
survey. The wave equations
% is solved using finite differences for a defined
initial wavefield.

% calculate time step dt from stability criterion for
finite difference
% solution of the wave equation.
dt = 0.9*min(min(dz./velocityModel/sqrt(2)));

% determine time samples nt from wave traveltime to
depth and back to
% surface
vmin = min(velocityModel(:));
nt = round(sqrt((dx*nx)^2 + (dz*nx)^2)*2/vmin/dt +
1);
t = (0:nt-1).*dt;

% add region around model for applying absorbing
boundary conditions (20
% nodes wide)
V = [repmat(velocityModel(:,1),1,20) velocityModel
repmat(velocityModel(:,end),1,20)];
V(end+1:end+20,:) = repmat(V(end,:),20,1);

% Define frequency parameter for ricker wavelet
f = 30;

```

```

%% Generate shots and save to file and video
vidObj =
VideoWriter('videos\marmousi3ModelShots.avi');
open(vidObj);
data = zeros(size(nt,nx));
figure(gcf)
for ixs = 21:nx+20 % shot loop
    % initial wavefield
    rw = ricker(f,nz+40,dt,dt*ixs,0);
    rw = rw(1:nz+20,:);

    % plot initial wavefield
    set(hshot, 'XData',x(ixs-20), 'YData',z(1));
    subplot(2,2,2)
    imagesc(x,z,rw(1:end-20,21:end-20))
    xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth (m)');
    title(['Shot ',num2str(ixs-20),' at
',num2str(x(ixs-20)),' m']);
    colormap(seismic)

    % generate shot record
    tic
    [data, snapshot] = fm2d(V,rw,nz,dz,nx,dx,nt,dt);
    toc
    save(['marmousi3ModelData\snapshot',num2str(ixs-
20),'.mat'],'snapshot');
    save(['marmousi3ModelData\shotfdm',num2str(ixs-
20),'.mat'],'data')

    data = data(21:end-20,:);
    if ixs<10;

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3shot000',n
um2str(ixs),'.sgy'], data, 0.0055);
    elseif ixs>99;

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3shot00',nu
m2str(ixs),'.sgy'], data, 0.0055);
    else

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3shot0',num
2str(ixs),'.sgy'], data, 0.0055);

```

```

end

if ismember(ixs-20,[1 nx/2 nx])
    start = 1;
else
    start = nt;
end

for i = start:nt
    % plot shot record evolution
    ds = zeros(nt,nx);
    ds(1:i,:) = data(1:i,:);
    subplot(2,2,3)
    imagesc(x,t,ds)
    xlabel('Distance (m)'), ylabel('Time (s)')
    title('Shot Record')
    caxis([-0.1 0.1])

    % plot wave propagation
    subplot(2,2,4)
    imagesc(x,z,snapshot(1:end-20,21:end-20,i))
    xlabel('Distance (m)'), ylabel('Depth (m)')
    title(['Wave Propagation t = ',num2str(t(i),'%10.3f')])
    caxis([-0.14 1])

    writeVideo(vidObj,getframe(gcf));
    drawnow;
end %shot loop
end
close(vidObj);

%% Traveltime by 2D ray-tracing
% Generate the traveltime field for all z = 0
locations
vidObj = VideoWriter('marmousi3ModelTravelTime.avi');
open(vidObj);
travelTime = zeros(nz,nx,nx);
subplot(2,2,2)
for ixs = 1:nx
    travelTime(:, :, ixs) = ray2d(velocityModel,[1
ixs],dx);
    imagesc(x,z,travelTime(:, :, ixs))

```

```

xlabel('Distance (m)'), ylabel('Depth (m)')
title(['Traveltime for shot ', num2str(ixs)])
set(hshot, 'XData', x(ixs));
drawnow
writeVideo(vidObj, getframe(gcf));
end
close(vidObj)
%save results for later re-use
save('marmousi3ModelData\travelTime.mat',
'travelTime')

%% Process Shots - Kirchhoff Migration
vidObj = VideoWriter('marmousi3ModelKirchhoff.avi');
open(vidObj);
load('travelTime.mat');
Stacked = zeros(nz, nx);
figure(gcf)
colormap seismic %bone
for ixs = 1:nx
    load(['shotfdm', num2str(ixs), '.mat'])
    shot = data(21:end-20, :);
    M = migrate(travelTime, shot, dt, nz, ixs, nx);
    Stacked = Stacked + M;
    if ixs<10;

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3kirchhoff00
0', num2str(ixs), '.sgy'], data, 0.145110);
elseif ixs>99;

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3kirchhoff00
', num2str(ixs), '.sgy'], data, 0.145110);
else

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3kirchhoffsh
ot0', num2str(ixs), '.sgy'], data, 0.145110);
end

subplot(2,2,2)
imagesc(x, z, Stacked)
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth (m)');
title('Stacked Image');
caxis([-135 135])

```

```

subplot(2,2,3)
imagesc(x,t,shot)
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Time (s)');
title(['Current Shot ',num2str(ixs)]);
caxis([-0.1 0.1])

subplot(2,2,4)
imagesc(x,t,M)
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Time (s)');
title(['Current Migrated Shot ',num2str(ixs)]);
caxis([-5 5])

set(hshot,'XData',x(ixs));

drawnow
writeVideo(vidObj,getframe(gcf));
end
altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3kirchhoffs
tacked',num2str(ixs),'.sgy'], Stacked, 0.145110);
close(vidObj);

%% Process Shots - Reverse Time Migration

vidObj = VideoWriter('videos\marmousi3ModelRTM.avi');
open(vidObj);
Stacked = zeros(nz+20,nx+40);
colormap seismic %bone
for ix = 1:nx
    load(['shotfdm',num2str(ix),'.mat'])
    shot = data(21:end-20,:);

    tic
    [~, rtmsnapshot] =
    rtm2d(V,data,nz,dz,nx,dx,nt,dt);
    toc

    save(['marmousi3ModelData\rtmsnapshot',num2str(ix),
'.mat'],'rtmsnapshot');

    load(['snapshot',num2str(ix),'.mat']);

    M = 0;

```

```

    s2 = 0;
    for i = 1:nt
        M = snapshot(:,:,i).*rtmsnapshot(:,:,nt-
i+1)+M;
        s2 = snapshot(:,:,i).^2+s2;

        if ismember(ixs,[1 nx/2 nx])
            subplot(2,2,3)
            imagesc(x,z,snapshot(1:end-20,21:end-
20,i))
            xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth
(m)');
            title(['Forward Time Wave Propagation t =
',num2str(t(i),'%10.3f')])
            caxis([-0.14 1])

            subplot(2,2,4)
            imagesc(x,z,rtmsnapshot(1:end-20,21:end-
20,nt-i+1))
            xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth
(m)');
            title('Reverse Time Wave Propagation')
            caxis([-0.14 1])

            subplot(2,2,2)
            imagesc(x,z,diff(M(1:end-20,21:end-
20)./s2(1:end-20,21:end-20),2,1))
            xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth
(m)');
            title(['Current Migrated Shot
',num2str(ixs)]);
            caxis([-0.05 .05])

            drawnow
            writeVideo(vidObj,getframe(gcf));
        end
    end

    Stacked = Stacked + M;
    subplot(2,2,2)
    imagesc(x,z,diff(Stacked(1:end-20,21:end-
20),2,1))
    xlabel('Distance (m)'); ylabel('Depth (m)');

```

```

title('Stacked Image');
caxis([-30 30])

subplot(2,2,3)
imagesc(x,t,shot)
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Time (s)');
title(['Current Shot ',num2str(ixs)]);
caxis([-0.1 0.1])

subplot(2,2,4)
imagesc(x,t,diff(M(1:end-20,21:end-20),2,1))
xlabel('Distance (m)'); ylabel('Time (s)');
title(['Current Migrated Shot ',num2str(ixs)]);
caxis([-1 1])
    if ix<10;

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3shot000',num2str(ixs),'.sgy'], diff(M(1:end-20,21:end-20),2,1), 0.145110);
    elseif ix>99;

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3shot00',num2str(ixs),'.sgy'], diff(M(1:end-20,21:end-20),2,1), 0.145110);
    else

altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3shot0',num2str(ixs),'.sgy'], diff(M(1:end-20,21:end-20),2,1), 0.145110);
    end

    set(hshot,'XData',x(ixs));
    drawnow
    writeVideo(vidObj,getframe(gcf));
end
altwriteseq(['marmousi3ModelData\marmousi3RTMStacked',num2str(ixs),'.sgy'], diff(Stacked(1:end-20,21:end-20),2,1), 0.145110);
close(vidObj);

```

## BIODATA PENULIS



Fuad Aulia Bahri lahir di Padang, 8 Oktober 1995 merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di TK Pertiwi Padang, SD Pertiwi 3 Padang (2002-2007), MTsN model Padang (2007-2010), SMAN 1 Padang (2010-2013). Hingga penulis menempuh pendidikan tinggi di departemen Teknik Geofisika ITS pada tahun (2013-2017). Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di 3 (tiga) organisasi yaitu, Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika ITS, UKM Karate-do, dan Society of Petroleum Engineering ITS Student Chapter. Penulis menjadi panitia di setiap acara-acara yang diadakan oleh masing-masing organisasi. Penulis pernah mempresentasikan paper pada *International Seminar on Science on Technology ITS 2016* dengan tema analisis air tanah pada daerah Surabaya. Penulis pernah mendapatkan pengalaman kerja praktik pada Badan Operasi Bersama PT. Bumi Siak Pusako – Pertamina Hulu dengan tema interpretasi seismik. Hingga pada akhirnya penulis memiliki passion pada bidang tomography seismik dan numerical processing. Penulis sangat senang jika ada yang ingin berdiskusi lebih lanjut terkait tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui email: [fuadbahri08@gmail.com](mailto:fuadbahri08@gmail.com) sekian dan terima kasih.